

ENG. JOEL GRIPP JUNIOR

CALIBRAÇÃO DE DISTANCIÔMETROS ELETRÔNICOS COM MEDIDAS DE CAMPO

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-
Graduação em Ciências Geodésicas para
obtenção do grau de Mestre em Ciências
pela Universidade Federal do Paraná.

CURITIBA
1986

CALIBRAÇÃO DE DISTANCIÔMETROS ELETRÔNICOS
COM MEDIDAS DE CAMPO

DISSERTAÇÃO

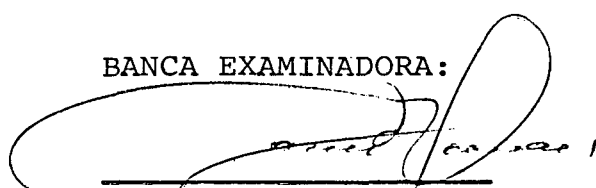
Apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Ciências
Geodésicas para obtenção do grau de Mestre em Ciências
pela Universidade Federal do Paraná.

Por

JOEL GRIPP JUNIOR, Engº Agrimensor

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
1986

BANCA EXAMINADORA:



DR. CAMIL GEMAE



DR. JOÃO BOSCO LUGNANI



Ms. ÁLVARO DOUBEK

AGRADECIMENTOS

Agradeço de forma especial, a Deus por ter-me dado força suficiente para realizar mais esta tarefa.

A Universidade Federal de Viçosa, por me ter permitido ausentar e realizar este Curso.

A todos os colegas do Departamento de Engenharia Civil da UFV, pelo apoio e incentivo.

Aos professores Álvaro Doubek e Camil Gemael, pela leitura, revisão, sugestões apresentadas e orientação da tese.

Ao João Fernando Custódio da Silva, interlocutor constante durante a realização deste trabalho.

Aos colegas que ajudaram na obtenção das observações de campo: Aparecida, Arana, Celso, Dalto, Júlio, Lívio, Márcia e Roberto.

Aos professores, colegas e funcionários do curso, pelo incentivo e ajuda.

R E S U M O

As indiscutíveis vantagens apresentadas pelo uso dos distanciômetros eletrônicos, só são válidas, evidentemente, se estes estiverem fornecendo observações isentas de erros sistemáticos. Com o uso e envelhecimento, as condições de medidas destes equipamentos podem variar, fazendo assim surgir erros sistemáticos. Decorre daí a necessidade de calibração periódica dos equipamentos de MED.

Neste trabalho são realizados estudos das origens e requisitos para a determinação destes erros. Os procedimentos a serem atendidos no estabelecimento de linhas bases de calibração são também discutidos.

Programas computacionais para a estimativa dos elementos de calibração são desenvolvidos. São desenvolvidos ainda programas para uso em calculadoras de bolso.

Dois distanciômetros eletrônicos são testados na linha base de calibração da UFPr.

ABSTRACT

The many advantages of the use of EDM equipments remain valid only if provided the compensation of systematic errors. Certain factors as aging and wearing out produce variations in the performance of this equipments. Consequently, periodical calibration is required.

The thesis studies the origins and requisits for detecting these systematic errors. The procedures for establishing calibration base lines are also discussed.

Computational programs for the estimate of calibration elements were developed. The same programs were also implemented for pocket calculator.

Two EDM equipments were tested at the calibration base line of the UFPr.

S U M Á R I O

TÍTULO-----	i
AGRADECIMENTOS-----	ii
RESUMO-----	iii
ABSTRACT-----	iv
SUMÁRIO-----	v
LISTA DE TABELAS-----	viii
LISTA DE FIGURAS-----	x
I. <u>INTRODUÇÃO</u> -----	1
II. <u>ANÁLISE DOS ERROS NA MEDIÇÃO ELETRÔNICA DE DISTÂNCIAS</u> <u>E ANÁLISE DA QUALIDADE DE OBSERVAÇÕES</u> -----	3
1. OBTENÇÃO DE DISTÂNCIAS ELETRÔNICAMENTE-----	4
2. ANÁLISE DOS ERROS-----	8
2.1 ERRO NA VELOCIDADE DAS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS (c)-----	10
2.2 ERRO NO ÍNDICE DE REFRAÇÃO (n_2)-----	12
2.2.1 PARA A LUZ E O INFRAVERMELHO-----	12
2.2.2 PARA MICROONDAS-----	16
2.3 ERRO NA FREQUÊNCIA DE MODULAÇÃO-----	18
2.4 ERRO NA DETERMINAÇÃO DA DIFERENÇA DE FASE-----	20
2.5 ERRO DE ZERO E ERRO CÍCLICO-----	21
3. ANÁLISE DAS OBSERVAÇÕES-----	22

III.	<u>CALIBRAÇÃO DE CAMPO</u>	24
1.	A CALIBRAÇÃO E OS REQUISITOS PARA A DETERMINAÇÃO DOS ERROS SISTEMÁTICOS	24
1.1	ERRO DE ZERO OU CONSTANTE ADITIVA	25
1.2	ERRO DE ESCALA OU ERRO PROPORCIONAL	25
1.3	ERRO CÍCLICO	26
2.	MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO RIGOROSA DOS ELEMENTOS DO ERRO CÍCLICO	29
3.	MÉTODO DA LINHA BASE DE CAMPO	31
3.1	ESTABELECIMENTO DA LINHA BASE	32
3.2	MODELOS MATEMÁTICOS	34
3.2.1	QUANDO AS DISTÂNCIAS SÃO CONHECIDAS	34
3.2.1.1	DETERMINAÇÃO DOS ELEMENTOS DO ERRO CÍCLICO COM DESENVOLVIMENTO EM SÉRIES DE FOURIER	36
3.2.1.2	DETERMINAÇÃO DOS ELEMENTOS DO ERRO CÍCLICO COM A EQUAÇÃO DO ERRO CÍCLICO NA FORMA LINEAR	39
3.2.2	QUANDO AS DISTÂNCIAS NÃO SÃO CONHECIDAS	39
IV.	<u>CÁLCULO DOS ELEMENTOS DE CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS DE MED COM OBSERVAÇÕES DA LINHA BASE DE CAMPO</u>	41
1.	AJUSTAMENTO DAS OBSERVAÇÕES	41
2.	CÁLCULO COM CALCULADORAS DE BOLSO	48
2.1	CÁLCULO DO ERRO DE ZERO E FATOR DE ESCALA	49
2.2	CÁLCULO DOS ELEMENTOS DO ERRO CÍCLICO	51

V.	<u>ESTUDO COMPARATIVO ENTRE CRITÉRIOS DE DISTRIBUIÇÃO</u>	
	<u>DOS PILARES NAS LINHAS BASES DE CAMPO-----</u>	56
1.	TESTES COM SIMULAÇÃO DE DADOS-----	56
VI.	<u>MEDIÇÕES NA LINHA BASE DE CALIBRAÇÃO DA UFPR</u>	
1.	A LINHA BASE DA UFPR-----	64
2.	OPERAÇÕES DE CAMPO-----	64
2.1	ELTA 2 DA ZEISS-----	66
2.2	TELURÔMETRO MA100-----	68
3.	RESULTADOS DOS AJUSTAMENTOS-----	70
3.1	ELTA 2 DA ZEISS-----	70
3.2	TELURÔMETRO MA100-----	73
4.	ANÁLISE DOS RESULTADOS-----	75
5.	DIFERENÇAS ENTRE RESULTADOS FORNECIDOS PELOS LE VANTAMENTOS COM OS DOIS DISTANCIÔMETROS-----	80
VII.	<u>CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES</u>	
1.	CONCLUSÕES-----	83
2.	RECOMENDAÇÕES-----	84
	APÊNDICE 1-PROCESSAMENTO DE DADOS-----	85
	APÊNDICE 2-PROGRAMA PARA A CALCULADORA PC1211RP DA SHARP-----	110
	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS-----	113

LISTA DE TABELAS

	Pg
1. ALGUNS DISTANCIÔMETROS-----	11
2. ERRO RELATIVO DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO PARA DIFERENTES DESVIOS DA TEMPERATURA-----	15
3. ERRO RELATIVO DO ÍNDICE DE REFRAÇÃO PARA DIFERENTES DESVIOS DA PRESSÃO ATMOSFÉRICA-----	15
4. DADOS SIMULADOS DE UMA LINHA BASE TIPO MULTI-PILARES-	58
5. DADOS SIMULADOS DE UMA LINHA BASE CONSTITUÍDA DE PA RES DE DISTÂNCIAS QUE DIFEREM A METADE DO MEIO COMPRI MENTO DA ONDA DE MODULAÇÃO (1°)-----	59
6. DADOS SIMULADOS DE UMA LINHA BASE CONSTITUÍDA DE PA RES DE DISTÂNCIAS QUE DIFEREM A METADE DO MEIO COMPRI MENTO DA ONDA DE MODULAÇÃO (2°)-----	60
7. DADOS SIMULADOS DE UMA LINHA BASE TIPO MULTI-PILARES-	61
8. DESNÍVEIS ENTRE PILARES DA LINHA BASE DA UFPR-----	65
9. RESULTADOS OBTIDOS EM TRÊS LEVANTAMENTOS COM O ELTA 2	67
10. RESULTADOS OBTIDOS EM DOIS LEVANTAMENTOS COM O MA100-	69
11. QUADRO GERAL DE RESULTADOS DOS AJUSTAMENTOS PARA O ELTA 2-----	70
12. QUADRO GERAL DE RESULTADOS DOS AJUSTAMENTOS PARA O MA100-----	73

		pg
13.	DIFERENÇAS ENTRE RESULTADOS DOS LEVANTAMENTOS COM O ELTA 2-----	77
14.	DIFERENÇAS ENTRE RESULTADOS DOS LEVANTAMENTOS COM O MA100-----	79
15.	DIFERENÇAS ENTRE RESULTADOS OBTIDOS COM OS DISTÂNCI <u>Ô</u> METROS ELTA 2 E MA100, CONSIDERANDO APENAS O ERRO DE ZERO DO MA100-----	81
16.	DIFERENÇAS ENTRE RESULTADOS OBTIDOS COM OS DISTÂNCI <u>Ô</u> METROS ELTA 2 E MA100, CONSIDERANDO TODOS OS ELEMEN- TOS DE CALIBRAÇÃO OBTIDOS NOS AJUSTAMENTOS-----	82

LISTA DE FIGURAS

	pg
1. DISTÂNCIA OBTIDA ELETRÔNICAMENTE-----	5
2. OBSERVAÇÕES MÍNIMAS PARA A OBTENÇÃO DO ERRO DE ZERO-	25
3. FASE (B) RELATIVO A EQUAÇÃO (3.1)-----	27
4. FASE (B) RELATIVO A EQUAÇÃO (3.2)-----	27
5. LINHA TESTE PARA DETERMINAÇÃO RIGOROSA DO ERRO CÍCLICO-----	29
6. ERRO CÍCLICO-----	30
7. DISTÂNCIAS MEDIDAS NUMA LINHA BASE DE MULTI-PILARES-	33
8. FUNÇÃO QUI-QUADRADO-----	75
9. RESÍDUOS E CURVA DO ERRO CÍCLICO - ELTA 2 (1º LEVANTAMENTO)-----	71
10. RESÍDUOS E CURVA DO ERRO CÍCLICO - ELTA 2 (2º LEVANTAMENTO)-----	71
11. RESÍDUOS E CURVA DO ERRO CÍCLICO - ELTA 2 (3º LEVANTAMENTO)-----	72
12. RESÍDUOS E CURVA DO ERRO CÍCLICO - MA100 (1º LEVANTAMENTO)-----	74
13. RESÍDUOS E CURVA DO ERRO CÍCLICO - MA100 (2º LEVANTAMENTO)-----	74

I. INTRODUÇÃO

O advento dos distanciômetros eletrônicos e o seu rápido desenvolvimento auxiliado pela eletrônica, possibilitou uma notável economia de tempo nas medições das distâncias que a princípio eram obtidas por exaustivas medições diretas no campo.

Além da facilidade de operação e portabilidade dos distanciômetros eletrônicos mais modernos, a precisão conseguida é suficiente para a sua utilização na maioria dos trabalhos geodésicos e topográficos.

No Brasil, o uso dos distanciômetros eletrônicos já está bastante comum, a ponto de quase todos órgãos do governo e empresas particulares possuírem um ou mais conjuntos de equipamentos, e isso considerando desde pequenas firmas de topografia até as grandes empresas de mapeamento. Entretanto, o procedimento de verificação se os equipamentos estão trabalhando ou não com suas precisões preconizadas, não é muito comum.

Em outros países, é comum a existência de leis que obriguem a calibração anual, semestral ou até mesmo antes de cada campanha de utilização do equipamento, já que sabe-se que os elementos de calibração dos distanciômetros eletrônicos podem sofrer variação com o uso e envelhecimento do equipamento.

No presente trabalho, faz-se um estudo dos métodos de ca

libração com a utilização de medidas de campo, e é realizada uma tentativa de colocar em operação, uma linha base de calibração já implantada no campus da Universidade Federal do Paraná.

Para melhor assimilação dos métodos de calibração, é realizado inicialmente um estudo sobre as principais origens de erros, isto por meio de uma análise dos erros inerentes à medição eletrônica de distâncias.

Os erros sistemáticos e os requisitos para as suas determinações com medidas de campo são pormenorizados. As condições que devem ser obedecidas nos projetos de construção das linhas bases são discutidas.

São apresentados os modelos matemáticos de ajustamento adequados para a determinação das constantes que possibilitam a correção dos erros sistemáticos com os respectivos programas de computação.

Além do processamento sem considerar limitações computacionais, é realizado também um desenvolvimento objetivando a determinação das correções utilizando-se simplesmente pequenos sistemas de processamento, como simples calculadoras de bolso.

São apresentados os resultados das primeiras medições realizadas na linha base de calibração da UFPR. Foram utilizados dois diferentes distanciômetros, sendo que para cada equipamento as distâncias eram medidas mais de uma vez, o que permitiu uma boa análise de resultados.

II. ANÁLISE DOS ERROS NA MEDIÇÃO ELETRÔNICA DE DISTÂNCIAS E ANÁLISE DE QUALIDADE DE OBSERVAÇÕES

Um requisito para uma boa análise da qualidade de observações é o conhecimento das diversas fontes de erros introduzidos nas distâncias observadas. Entre estas fontes, tem-se: |16|

- 1- Erros na centragem do distanciômetro e refletores.
- 2- Pontaria inadequada.
- 3- Erros nas alturas dos instrumentos.
- 4- Medição sob condições extremas ou em áreas onde fatores externos não preditos afetam o instrumento.
- 5- Não familiaridade com as condições de operação do instrumento de MED.
- 6- Erro de alinhamento (problemas no sistema ótico de visada).
- 7- Dados meteorológicos errados.
- 8- Erros inerentes ao processo eletrônico de obtenção de distâncias (constantes do instrumento, variação de frequências, etc.).

Do acima, pode-se ver que muitos destes erros podem ser minimizados por meio de procedimentos adequados e cuidados na obtenção das observações.

Os erros inerentes ao processo eletrônico de obtenção de distâncias, podem ser determinados por um processo de calibração. Para melhor estudá-los será realizado, a seguir, um estudo das principais origens destes erros, por meio do uso da lei de propagação de erros aplicada às equações envolvidas no assunto.

Posteriormente será realizado um estudo visando a análise da qualidade de observações.

II.1 OBTENÇÃO DE DISTÂNCIA ELETRÔNICAMENTE:

Quase todos os instrumentos de MED utilizam o mesmo princípio de medição de distância. Um sinal modulado é transmitido de uma das extremidades da linha a ser medida. Na outra extremidade este sinal é refletido (ou retransmitido) para a estação de origem e o sinal modulado de retorno é então analisado.

A distância D entre o ponto onde o sinal é transmitido e o ponto onde é refletido (ou retransmitido) pode ser expressa da seguinte forma:

$$D = m \frac{\lambda}{2} + u \quad (2.1)$$

onde: m — é o número de meios comprimento de onda;

λ — comprimento da onda de modulação básica;

u — fração do meio comprimento de onda.

Ex.:

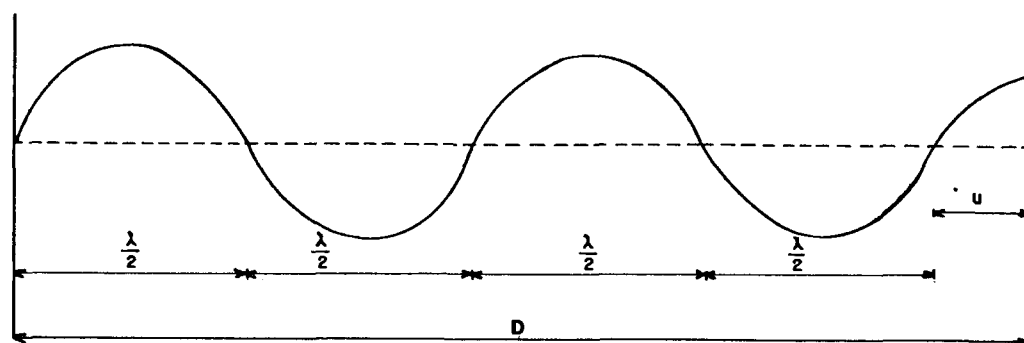


FIGURA 1 - Distância obtida eletronicamente

O instrumento obtém eletronicamente os valores de \underline{m} e \underline{u} . Geralmente \underline{m} é obtido pela combinação apropriada de ondas com frequências diferentes. \underline{u} é resultado da transformação do valor obtido eletronicamente para a diferença de fase, e para a obtenção deste valor, os diversos distanciômetros podem utilizar diferentes componentes eletrônicos. [6], [10], [11] e [23].

O comprimento de onda $\underline{\lambda}$ é uma função da frequência de modulação \underline{f} e da velocidade \underline{v} de propagação das ondas eletromagnéticas:

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (2.2)$$

No vácuo, a velocidade de propagação é constante para todas as ondas eletromagnéticas e é igual a $c = 299.792,5 \text{ km/s}$, conforme recomendação da UGGI em 1957.

Na atmosfera, a velocidade de propagação (v) é sempre menor que \underline{c} e pode ser calculada por:

$$v = \frac{c}{n} \quad (2.3)$$

onde \underline{n} é o índice de refração do ar que é função da densidade do ar e comprimento da onda portadora.

O valor de \underline{n} pode ser determinado com base em medidas meteorológicas da temperatura, pressão e umidade do ar ao longo da linha que liga os dois pontos cuja distância é desejada.

A frequência de modulação é altamente estabilizada e é conhecida com alta precisão.

Sabendo-se então, para o momento da medida, o valor de \underline{n} e \underline{f} , o comprimento do sinal modulado $\underline{\lambda}$ pode ser obtido por:

$$\lambda = \frac{c}{nf} \quad (2.4)$$

Os fabricantes geralmente consideram condições atmosféricas específicas para as quais temos um índice de refração $\underline{n_1}$ e comprimento de onda $\underline{\lambda_1}$, que pode ser obtido por:

$$\lambda_1 = \frac{c}{n_1 f} \quad (2.5)$$

Assim a distância registrada pelo instrumento de MED é igual a:

$$D_1 = m_1 \frac{\lambda_1}{2} + u_1 \quad (2.6)$$

Durante as observações de campo, geralmente temos um índice de refração $\underline{n_2}$ diferente de $\underline{n_1}$, logo o valor correto do com-

primento de onda λ_2 será igual a:

$$\lambda_2 = \frac{c}{n_2 f} \quad (2.7)$$

e para a distância:

$$D = m \frac{\lambda_2}{2} + u_2 \quad (2.8)$$

Das equações (2.5) e (2.7), temos $\frac{c}{f} = n_1 \lambda_1$, $\frac{c}{f} = n_2 \lambda_2$. .
 $n_1 \lambda_1 = n_2 \lambda_2$, então:

$$\lambda_2 = \lambda_1 \frac{n_1}{n_2} \quad (2.9)$$

Finalmente considerando a diferença de condições atmosféricas, a distância medida corrigida será:

$$D = D_1 \frac{n_1}{n_2} = m \frac{\lambda_1}{2} \frac{n_1}{n_2} + u_1 \frac{n_1}{n_2}$$

mas considerando a equação (2.9)

$$D = m \frac{\lambda_2}{2} + u_1 \frac{n_1}{n_2}, \text{ e considerando a equação (2.7):}$$

$$D = \frac{m c}{2 n_2 f} + u_1 \frac{n_1}{n_2} \quad (2.10)$$

O centro eletrônico do instrumento de MED geralmente não coincide exatamente com o centro geométrico de centragem, logo tem-se que acrescentar à distância esta parte aditiva (ou subtrativa) que é o denominado erro de zero ou constante aditiva (z_0).

Deve-se ainda aplicar à distância medida uma correção afim de reduzi-la a um nível de referência.

A distância final reduzida $\underline{D_o}$ é, portanto, fornecida pela equação:

$$D_o = m \frac{c}{2 n_2 f} + u_1 \frac{n_1}{n_2} + z_o + \Delta s \quad (2.11)$$

O comprimento de u_1 é geralmente pequeno (menor que 10m), logo pode-se considerar: $u_1 = u_1 \frac{n_1}{n_2}$ então:

$$D_o = \frac{m c}{2 n_2 f} + u_1 + z_o + \Delta s \quad (2.12)$$

II.2 ANÁLISE DOS ERROS:

Aplicando a lei de propagação de erros* a equação (2.12):

$$\sigma_{D_o}^2 = \left(\frac{m}{2n_2 f}\right)^2 \sigma_c^2 + \left(\frac{m c}{2n_2 f^2}\right)^2 \sigma_f^2 + \left(\frac{m c}{2n_2^2 f}\right)^2 \sigma_{n_2}^2 + \sigma_{u_1}^2 + \sigma_{z_o}^2 + \sigma_{\Delta s}^2$$

Pode-se fazer:

$$\sigma_{D_o}^2 = \left(\frac{m c}{2n_2 f}\right)^2 \frac{\sigma_c^2}{c^2} + \left(\frac{m c}{2n_2 f}\right)^2 \frac{\sigma_f^2}{f^2} + \left(\frac{m c}{2n_2 f}\right)^2 \frac{\sigma_{n_2}^2}{n_2^2} + \sigma_{u_1}^2 + \sigma_{z_o}^2 + \sigma_{\Delta s}^2$$

$$\sigma_{D_o}^2 = \left(\frac{m c}{2n_2 f}\right)^2 \left(\frac{\sigma_c^2}{c^2} + \frac{\sigma_f^2}{f^2} + \frac{\sigma_{n_2}^2}{n_2^2}\right) + \sigma_{u_1}^2 + \sigma_{z_o}^2 + \sigma_{\Delta s}^2$$

e por aproximação pode-se fazer:

(*) A lei de propagação de erros(ou variâncias) será aplicada considerando não correlação entre os elementos envolvidos.

$$\sigma_{D_0}^2 = D^2 \left[\left(\frac{\sigma_c}{c} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_f}{f} \right)^2 + \left(\frac{\sigma_{n_2}}{n_2} \right)^2 \right] + \sigma_{u_1}^2 + \sigma_{z_0}^2 + \sigma_{\Delta s}^2 \quad (2.13)$$

onde:

- σ_{D_0} - desvio padrão da distância D₀;
- σ_c - desvio padrão da velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo;
- σ_f - desvio padrão da frequência de propagação;
- σ_{n_2} - desvio padrão do índice de refração n₂;
- σ_{u_1} - desvio padrão da diferença de fase u₁;
- σ_{z_0} - desvio padrão da constante aditiva (erro de zero);
- $\sigma_{\Delta s}$ - desvio padrão da correção Δs.

E assim pela equação (2.13) é fácil verificar que:

- erros em c, f e n₂ irão influenciar na distância de forma proporcional à mesma;
- a influência de erros em u₁ e z₀ será a mesma para qualquer distância (será constante).

As considerações anteriores explicam a razão pela qual, de modo geral, as precisões especificadas para distanciômetros se apresentam na forma:

$$\sigma_D = \pm (a + bD) \quad (\text{veja tabela 1}) \quad (2.14)$$

Os elementos da fórmula (2.14) são por simplificação:

$$a^2 = \sigma_{u_1}^2 + \sigma_{z_0}^2$$

$$b^2 = \left(\frac{\sigma_c}{c}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_f}{f}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_{n_2}}{n_2}\right)^2$$
(2.15)

e a equação (2.13) fica:

$$\sigma_{D_0}^2 = a^2 + b^2 D^2 + \sigma_{\Delta s}^2$$
(2.16)

Será realizado a seguir, separadamente, uma discussão rápida sobre cada fonte de erro.

II.2.1 ERRO NA VELOCIDADE DAS ONDAS ELETROMAGNÉTICAS (C):

O valor de \underline{c} foi aceito em 1957 como sendo igual a $c = 299.792,5$ km/s com um desvio padrão de $\sigma_c = 0,4$ km/s [10]. Posteriormente este valor de \underline{c} foi confirmado com um desvio padrão de $0,1$ km/s [8], que corresponde a um erro relativo de 0,33 ppm.

Apesar de pequeno, a influência de $\underline{\sigma_c}$ é constante na de terminação do desvio padrão da distância.

FABRICANTE (PAÍS)	MODELO	PRECISÃO		ALCANCE	ONDA PORTADORA
AGA (SUÉCIA)	Geodimeter 220	3mm+	3ppm	4,0km	LUZ
	Geodimeter 14A	5mm+	3ppm	8,0km	LUZ
	Geodimeter M6BL	5mm+	2ppm	25,0km	LASER
KERN (SUÉCIA)	DM 102	5mm+	5ppm	1,7km	I V
	DM 503	3mm+	2ppm	5,0km	I V
	Mekometer ME5000	0,2mm+0,2ppm		8,0km	LASER
KEUFFEL & ESSER(USA)	Autoranger A	1mm+	3ppm	1,6km	I V
	Autoranger III	5mm+	2ppm	4,0km	I V
PENTAX (JAPÃO)	PX-06D	5mm+	5ppm	2,0km	I V
TELLUROME- TER (INGLATER- RA)	MA100	1,5mm+	2ppm	2,0km	IV
	MRA101	1,5cm+	2ppm	50,0km	MO
	MRA 4	0,3cm+	5ppm	2,0km	MO
WILD (SUIÇA)	DI20	5mm+	1ppm	14km	I V
	DI3000	5mm+	1ppm	14km	LASER
ZEISS (ALEMANHA FEDERAL)	ELDI 2	5mm+	2ppm	2,0km	I V
	ELDI 2	5mm+	2ppm	2,0km	I V

Tabela 1 - Exemplos de distanciômetros eletrônicos com algumas especificações fornecidas pelos fabricantes.

I V — infravermelho

MO — microondas

II.2.2 ERRO NO ÍNDICE DE REFRAÇÃO (n_2)

II.2.2.1 PARA A LUZ E O INFRAVERMELHO

O índice de refração para uma atmosfera padrão em que o ar seco está a 0°C, 760 mmHg e com 0,03% de dióxido de carbono, pode ser calculado pela fórmula de Barrel e Sears: [10]

$$(n_o - 1) 10^6 = 287,604 + \frac{4,8864}{\lambda^2} + \frac{0,068}{\lambda^4} \quad (2.17)$$

onde: λ é o comprimento da onda de modulação em μm .

Para as condições de medida temos que o índice de refração pode ser calculado por: [10]

$$(n - 1) = \frac{0,359408(n_o - 1) P}{273,15 + t} - \frac{15,02}{273,15 + t} \cdot 10^{-6} \cdot e \quad (2.18)$$

onde: \underline{e} - é a pressão parcial do vapor d'água em mmHg;

\underline{t} - é a temperatura do ar em °C; e

\underline{P} - a pressão atmosférica em mmHg.

Pode-se obter \underline{e} em polHg usando a fórmula: [10]

$$e = e' - 0,000367 \cdot P \cdot (t - t') \left(1 + \frac{t' - 32}{1571}\right) \quad (2.19)$$

onde: t - temperatura do ar (bulbo seco), em °F;

t' - temperatura do ar (bulbo úmido), em °F;

P - pressão atmosférica, em polHg;

e' - pressão do vapor saturado, em polHg.

Para trabalhar com \underline{t} e \underline{t}' em $^{\circ}\text{C}$ e \underline{P} e \underline{e}' em mmHg, obtendo \underline{e} em mmHg, a equação (2.19) pode ser apresentada como:

$$e = e' - 0,0006606 \cdot P \cdot (t - t') \cdot \left(1 + \frac{t'}{872,778}\right) \quad (2.20)$$

A pressão do vapor saturado (e') pode ser obtida utilizando-se tabelas meteorológicas ou simplesmente pela equação de MAGNUS [1]:

$$e' = 6,11 \cdot 10^{\frac{7,5 t}{237,3 + t}} \quad (2.21)$$

para temperaturas em que $t' > 0^{\circ}\text{C}$.

Aí: \underline{e}' - é fornecido em mb;

\underline{t} - é a temperatura do ar (bulbo seco) em $^{\circ}\text{C}$.

Para obter \underline{e}' em mmHg, a equação (2.21) pode ser apresentada como:

$$e' = 4,5828895 \cdot 10^{\frac{7,5 t}{237,3 + t}} \quad (2.22)$$

Afim de verificar a influência de erros nas medidas das temperaturas \underline{t} e \underline{t}' e da pressão atmosférica, será considerada a equação (2.18) e sobre ela aplicada a lei de propagação de erros:

$$\sigma_n^2 = \left(\frac{0,359408(n_0-1)}{273,15 + t} \right)^2 \sigma_P^2 +$$

$$\begin{aligned}
 & + \left(\frac{15,02 \cdot 10^{-6} \cdot e - P \cdot 0,359408 \cdot (n_o - 1)}{(273,15 + t)^2} \right)^2 \sigma_t^2 + \\
 & + \left(\frac{15,02 \cdot 10^{-6}}{273,15 + t} \right)^2 \sigma_e^2
 \end{aligned} \quad (2.23)$$

Da equação pode-se ver com simplicidade que a influência da umidade do ar, representada por e , é negligenciável, já que é da ordem do milésimo de 1 ppm e, portanto, muito pequena para as aplicações práticas. Assim sendo a equação (2.23), fica:

$$\sigma_n^2 = \left(\frac{0,359408(n_o - 1)}{273,15 + t} \right)^2 \sigma_P^2 + \left(- \frac{0,359408(n_o - 1) \cdot P}{(273,15 + t)^2} \right)^2 \sigma_t^2 \quad (2.24)$$

Para sentir a aplicação da equação anterior, seja o seguinte exemplo:

. equipamento: ELTA 2 da ZEISS ($\lambda = 0,910 \mu\text{m}$)

Pela equação (2.17) obtém-se $n_o = 1,000287$.

1º) Supondo um trabalho realizado com as seguintes condições atmosféricas:

-temperatura do ar (bulbo seco) $t = 20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$;

-temperatura do ar (bulbo úmido) $t' = 15^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$;

-pressão atmosférica $P = 750 \text{ mmHg} \pm 2,5 \text{ mmHg}$.

$$\begin{aligned}
 \sigma_n^2 = & \left(\frac{0,359408(1,000287-1)}{273,15 + 20} \right)^2 \cdot (2,5)^2 + \\
 & + \left(\frac{0,359408(1,000287-1) \cdot 750}{(273,15 + 20)^2} \right)^2 \cdot (1,0)^2
 \end{aligned}$$

$$\sigma_n^2 = (0,000000351)^2 \cdot 6,25 + (0,0000009)^2$$

$$\sigma_n = 0,000001257 = 1,26 \times 10^{-6}$$

Pela equação (2.18) $n = 1,000263131,$

então: $(\frac{\sigma_n}{n}) = 1,26 \times 10^{-6}$ ou 1,26 ppm.

2º) Mantendo-se constante os outros elementos e variando apenas σ_t (ver tabela 2).

3º) Idem, variando apenas σ_p (ver tabela 3).

σ_t	$\frac{\sigma_n}{n}$
0,5°C	0,99 ppm
1,0	1,26
1,5	1,61
2,0	2,00
2,5	2,42
3,0	2,84
3,5	3,27
4,0	3,71
4,5	4,14
5,0	4,58

Tabela 2

σ_p	$\frac{\sigma_n}{n}$
0,5 mmHg	0,92 ppm
1,0	0,96
1,5	1,04
2,0	1,14
2,5	1,26
3,0	1,39
3,5	1,52
4,0	1,67
5,0	1,97
10,0	3,62

Tabela 3

Como pode-se ver, a influência de erros nas observa - ções meteorológicas é bastante considerável e principalmente de vido ao fato de que na prática, as temperaturas e pressão são me

didadas somente nas extremidades das distâncias a medir, ou somente em uma extremidade.

Pelo exposto, vê-se que é de vital importância que sejam tomadas as observações meteorológicas com o máximo de cautela. Os termômetros e barômetros devem ser frequentemente aferidos

11.2.2.2 PARA MICROONDAS:

O índice de refração para microondas pode ser calculado pela fórmula de Essen e Froome: [8]

$$(n-1) = \frac{103,49}{T} \cdot 10^{-6} \cdot P + \left(\frac{0,496}{T^2} - \frac{17,23}{T} \cdot 10^{-6} \right) \cdot e \quad (2.25)$$

onde: $T = 273,15^{\circ}\text{C} + t$;

t = temperatura do ar (em $^{\circ}\text{C}$);

P e e = em mmHg.

Para verificar a influência de σ_t , σ_p e σ_e , aplica-se a lei de propagação de erros à equação (2.25):

$$\begin{aligned} \sigma_n^2 = & \left(\frac{103,49}{T} \cdot 10^{-6} \right)^2 \sigma_P^2 + \\ & + \left(\frac{17,23 \cdot e \cdot 10^{-6}}{T^2} - \frac{103,49 \cdot P \cdot 10^{-6}}{T^2} - \frac{0,992 \cdot e}{T^3} \right)^2 \cdot \sigma_T^2 + \\ & + \left(\frac{0,496}{T^2} - \frac{17,23}{T} \cdot 10^{-6} \right)^2 \cdot \sigma_e^2 \end{aligned} \quad (2.26)$$

A influência de erros em \underline{e} aqui é considerável, assim para tal verificação aplica-se a lei de propagação às fórmulas (2.22) e (2.20):

$$\sigma_{e'}^2 = \left(\frac{18780,7995}{(237,3+t)^2} \right) \cdot 10^{\frac{7,5 \cdot t}{237,3+t}} \sigma_t^2 \quad (2.27)$$

$$\begin{aligned} \sigma_e^2 = & \sigma_{e'}^2 + (-0,0006606 \cdot (t-t') \cdot (1 + \frac{t'}{872,778}))^2 \sigma_P^2 + \\ & + (-0,0006606 \cdot P \cdot (1 + \frac{t'}{872,778}))^2 \sigma_t^2 + \\ & + (-0,0006606 \cdot P \cdot (\frac{t-2t'}{872,778} - 1))^2 \sigma_t^2, \end{aligned} \quad (2.28)$$

Exemplo de aplicação:

Supondo um trabalho realizado nas mesmas condições atmosféricas do exemplo para equipamentos com infravermelho visto anteriormente:

$$t = 20^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$$

$$t' = 15^\circ\text{C} \pm 1^\circ\text{C}$$

$$P = 750 \text{ mmHg} \pm 2,5 \text{ mmHg}$$

com (2.22), obtêm-se: $e' = 17,54351 \text{ mmHg}$;

com (2.20), obtêm-se: $e = 15,02368 \text{ mmHg}$;

com (2.25), obtêm-se: $n = 1,000351482$;

com (2.27), obtêm-se: $\sigma_{e'} = 1,825858025 \text{ mmHg}$;

com (2.28), obtêm-se: $\sigma_e = 1,297873353 \text{ mmHg}$;

aplicando agora a fórmula (2.26) com os elementos em separado ,
chega-se em:

$$\left(\frac{\sigma}{n}\right) = 0,000\ 000\ 879 \text{ para o desvio padrão de } P;$$

$$\left(\frac{\sigma}{n}\right) = 0,000\ 000\ 899 \text{ para o desvio padrão em } t;$$

$$\left(\frac{\sigma}{n}\right) = 0,000\ 006\ 600 \text{ para o desvio padrão em } e;$$

e considerando $\underline{\sigma_p}$, $\underline{\sigma_t}$ e $\underline{\sigma_e}$, vem:

$$\left(\frac{\sigma}{n}\right) = 0,000\ 00672 \quad \text{ou} \quad 6,72 \text{ ppm.}$$

Assim, por este exemplo já dá para concluir que a influência de erros na determinação de \underline{e} é crítica para microondas. Também foi afirmado em [8] que um erro de 1 mmHg em \underline{P} produz erro de aproximadamente $\frac{\sigma_n}{n} = 0,4$ ppm para temperaturas entre -30°C e $+30^\circ\text{C}$. Um erro de 1°C em \underline{t} produz erros entre 0,8 a 2 ppm para valores extremos de P e t .

II.2.3 ERRO NA FREQUÊNCIA DE MODULAÇÃO:

Frequências de oscilação são medidas em unidades de hertz (Hz) — 1 Hz = 1 ciclo por segundo

$$10^3 \text{ Hz} = 1 \text{ kHz}$$

$$10^6 \text{ Hz} = 1 \text{ MHz}$$

$$10^9 \text{ Hz} = 1 \text{ GHz}$$

O comprimento da onda de modulação λ é fornecido por:

$$\lambda = \frac{v}{f}$$

Considerando constante a velocidade v e aplicando a lei de propagação de erros, vem:

$$\sigma_{\lambda}^2 = \frac{v^2}{f^4} \cdot \sigma_f^2 \quad (2.29)$$

Para sentir a aplicação das fórmulas anteriores, seja como exemplo o distanciômetro ELTA 2 da ZEISS. Como frequências de modulação ele utiliza:

$$f_1 \approx 15 \text{ MHz}; \quad f_2 \approx 300 \text{ kHz} \quad \text{e} \quad f_3 \approx 30 \text{ kHz}.$$

Considerando por aproximação a velocidade $v = 300.000 \text{ km/s}$.

Neste caso: $\lambda_1 \approx 20 \text{ m}$ (fina);

$$\lambda_2 \approx 1000 \text{ m};$$

$$\lambda_3 \approx 10.000 \text{ m, e para a medida fina:}$$

σ_f	σ_{λ}
0,5 Hz	$0,67 \times 10^{-6}$
1,0	1,33
2,0	2,67
3,0	4,00
4,0	5,33
5,0	6,67
10,0	13,33
50,0	66,67

CHYZANOWSKI afirma em [8] que a frequência de modulação pode ser calibrada com uma precisão de cerca de 0,1 ppm e pode ser estabilizada durante o uso do equipamento de MED com poucos Hz, se o circuito de oscilação que incluye cristais de quartzo é mantido em uma temperatura constante. Se a temperatura não é controlada, poderão ocorrer erros de 10 ppm ou mais. A maioria dos instrumentos é equipada com termostatos e requerem assim um tempo de aquecimento.

Com o envelhecimento e uso dos equipamentos, os cristais controladores das oscilações podem sofrer variações que ocasionam sérios erros nas frequências geradas. Segundo CHYZANOWSKI, os equipamentos com microondas mostram um desvio de cerca de 50 Hz por ano para a frequência de modulação, por exemplo, de 10 MHz, o que produz um erro de 5 ppm. Assim, já que os erros podem chegar a tal grandeza, é importante a verificação das frequências no mínimo uma vez por ano, ou antes de cada campanha de medição.

Para a calibração da frequência, é utilizado o Frequencímetro, porém se este não for disponível, pode-se usar outro método de calibração em que determina-se a influência do erro de frequência somado ao erro na determinação do índice de refração, bem como outros erros, como será elucidado posteriormente.

II.2.4 ERRO NA DETERMINAÇÃO DA DIFERENÇA DE FASE:

Como já foi mencionado, a medida da diferença de fase

entre os sinais emitidos e recebidos, é a base de medida de qua se todos os distanciômetros eletrônicos.

Nos últimos anos a precisão da medida de fase tem crescido, assim se nos primeiros equipamentos uma resolução de $1/100$ do meio comprimento de onda era normal, agora a resolução já po de ser superior a $1/1000$.

Existem diversos processos para a medição da diferença de fase, e uma boa descrição dos mesmos pode ser encontrada em [6], [10] e [23].

Nos aparelhos mais comuns, o meio comprimento da onda de modulação é de cerca de 10 m, portanto com um erro de 10 mm, em uma simples determinação. No mekômetro o meio comprimento da onda é de 0,30 m, tendo, portanto, um erro bem menor, de apenas 0,3 mm. Para melhorar a precisão, as medidas de fase são geralmente repetidas algumas vezes no processo da determinação de distância, sendo assim o erro de fase diminuído por se tomar a mêdia dos resultados.

As medidas de fase em instrumentos com microondas podem ser seriamente afetadas por reflexões dos sinais pelo solo. Alguns cuidados podem ser tomados para reduzir este efeito, e entre eles tem-se a mudança de posição do equipamento.

II.2.5 ERRO DE ZERO E ERRO CÍCLICO:

Erro de zero ou constante aditiva é a distância entre o

centro eletrônico e o centro geométrico ou centro de centragem do instrumento de MED.

Os fabricantes geralmente fornecem valores para o erro de zero e os instrumentos mais modernos tem sido preparados para que este erro seja nulo ou não considerável. Todavia, com o uso do equipamento, o valor do erro de zero pode variar, daí a importância da calibração do equipamento por meio, por exemplo, de uma linha base de campo.

Além do erro constante (erro de zero), o equipamento pode ter também o denominado erro cíclico que é proveniente de erros na determinação da diferença de fase. O erro cíclico ocorre de forma cíclica dentro de meio comprimento de onda e sendo a correção, portanto, variável para diferentes distâncias.

11.3 ANÁLISE DAS OBSERVAÇÕES:

Afim de verificar a qualidade das observações e constantes dos distanciômetros e refletores, pode-se efetuar medidas com os mesmos sobre, por exemplo, uma base cujas distâncias são conhecidas. Aplicando às medidas as constantes do equipamento, obtêm-se as observações que deverão ser analisadas.

Como critério de verificação da qualidade das observações, FRONCZEK em [16] faz as seguintes considerações: obtêm-se os desvios padrão das observações pela equação (2.16) ou $\sigma_D^2 = a^2 + b^2 D^2 + \sigma_{\Delta S}^2$ seguindo as especificações do equipamento e

processo de redução utilizado, e faz-se uma comparação destes desvios com as diferenças entre as distâncias observadas e conhecidas, levando-se em conta um determinado limite de tolerância. Estatisticamente se for considerado apenas um desvio padrão (1σ), 68,3% das diferenças devem estar dentro das especificações, ou seja, menores que 1σ . Afim de que não haja rejeição de observações válidas, o limite de três vezes o desvio padrão (3σ) é geralmente escolhido para decidir se uma observação é aceitável ou não. Teoricamente, neste caso, 99,7% dos valores absolutos das diferenças devem ser menores que 3σ .

Para as considerações anteriores, FRONCZEK organiza a seguinte sequência:

-Calcular as diferenças. Se 99,7% das observações tiverem diferenças menores que três vezes o desvio padrão (3σ) obtido pela equação (2.16) ou 68,3% forem menores que um desvio padrão (1σ), o equipamento pode ser aceito como preciso e confiável. Se as diferenças não estiverem dentro das especificações acima, deve-se estudar o comportamento destas diferenças, se são constantes ou proporcionais às distâncias, e então fazer as aplicações de calibração do equipamento.

III. CALIBRAÇÃO DE CAMPO

III.1 A CALIBRAÇÃO E OS REQUISITOS PARA A DETERMINAÇÃO DOS ERROS SISTEMÁTICOS

A calibração dos instrumentos de MED consiste basicamente de uma forma refinada de medidas objetivando a verificação e obtenção do comportamento dos erros sistemáticos inerentes ao equipamento.

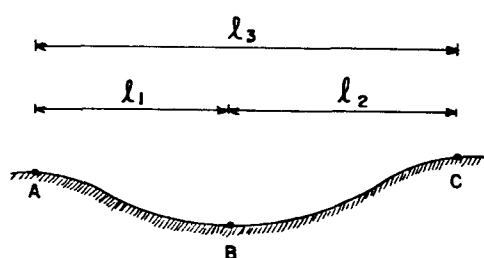
Pode-se realizar a calibração em laboratório ou com medidas de campo. Para a calibração de laboratório é necessário a disponibilidade de alguns equipamentos adicionais, tal como o freqüencímetro. Alguns detalhes quanto a este procedimento podem ser obtidos em [2]. Já a calibração de campo é bastante acessível, principalmente devido às poucas condições mínimas necessárias. Além da pequena quantidade de equipamentos adicionais, a obtenção das medidas é acessível a qualquer operador que esteja familiarizado com o equipamento.

Afim de melhorar a compreensão dos procedimentos necessários à calibração de campo, é importante conhecer com detalhes os erros sistemáticos e os requisitos para a determinação dos mesmos.

III.1.1 ERRO DE ZERO OU CONSTANTE ADITIVA:

O erro de zero em alguns instrumentos de MED pode ser bem grande e, por exemplo, como diz CHRZANOWSKI em [8], em alguns modelos de Telurômetros e Geodímetros é de cerca de 30 cm. Os fabricantes sempre dão informações sobre o valor da constante aditiva, todavia, tem sido verificado que este valor pode variar com o uso e envelhecimento do equipamento. CHRZANOWSKI diz também que nos instrumentos eletroóticos esta variação é geralmente pequena (no máximo poucos milímetros), mas nos instrumentos com microondas ela pode ser da ordem de alguns centímetros.

Para verificar a existência do erro de zero, um procedimento mínimo seria, por exemplo, como na figura 2, medir o comprimento total ℓ_3 e também os comprimentos ℓ_1 e ℓ_2 , ou



$$\ell_1 = d_1 + z_0$$

$$\ell_2 = d_2 + z_0$$

$$\ell_3 = d_1 + d_2 + z_0$$

FIGURA 2 - Observações mínima para a obtenção do erro de zero.

portanto o erro de zero (z_0), será:

$$z_0 = \ell_1 + \ell_2 - \ell_3$$

III.1.2 ERRO DE ESCALA OU ERRO PROPORCIONAL:

Como foi mencionado no item II.2, erros nos valores

considerados para a velocidade de propagação das ondas eletromagnéticas no vácuo (c), na frequência de modulação (f) e no índice de refração do ar (n) influenciam na distância de forma proporcional à mesma, ou seja, fazem surgir um erro de escala.

Para verificar a existência deste erro, deve-se medir com o equipamento de MED, um comprimento que possa servir de escala. Para isto, este comprimento deve ter sido medido anteriormente com um equipamento mais preciso e que esteja devidamente calibrado, ou seja, que os seus elementos de calibração sejam perfeitamente conhecidos.

III.1.3 ERRO CÍCLICO

É um erro proveniente de falhas na determinação da diferença de fase. É periódico sobre a metade do comprimento da onda de modulação do equipamento. Os fabricantes geralmente preparam os equipamentos para que os erros cíclicos tenham pequenas amplitudes, de forma que possam ser ignorados, todavia, já que grandes erros cíclicos podem ocorrer e devido ao fato da amplitude deste erro poder variar com o uso e envelhecimento do equipamento, a sua determinação deve ser incluída em calibrações periódicas dos instrumentos de MED.

O erro cíclico tem a mesma configuração a cada meio comprimento da onda de modulação fina do equipamento ($\lambda'/2$), e esta configuração que muito se assemelha a uma curva senoidal, pode ser expressa por uma das equações a seguir |9|, |25|, |19|, |28|, |30|, |31|, etc....:

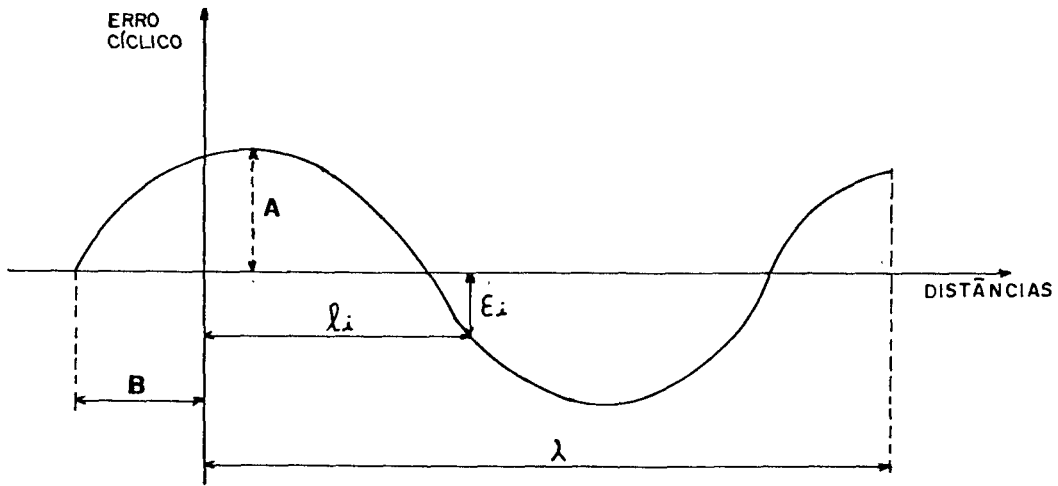


FIGURA 3- Fase (B) relativo a equação 3.1

$$\epsilon_i = A \operatorname{sen} \left| \frac{2\pi}{\lambda} (\ell_i + B) \right| \quad (3.1)$$

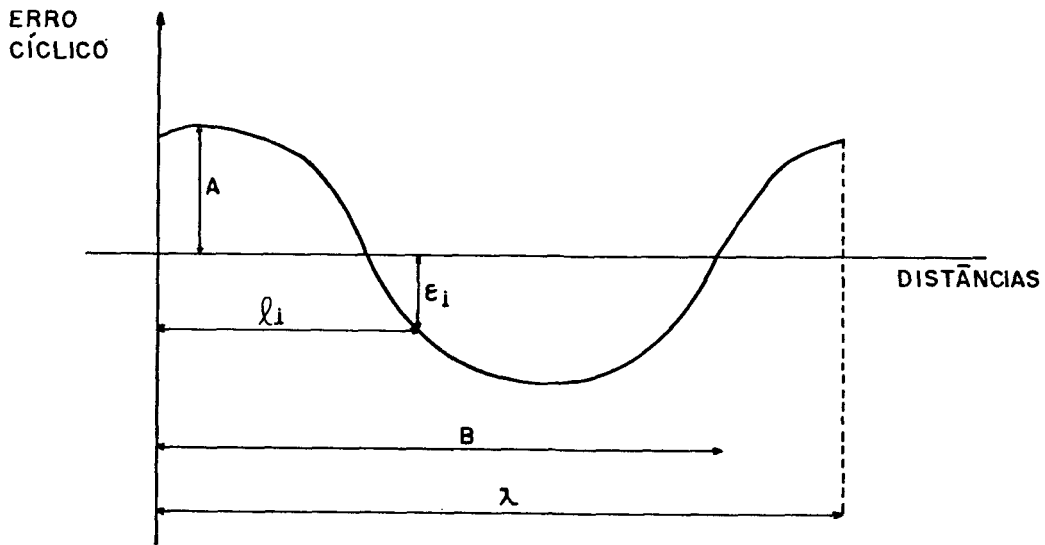


FIGURA-4 _ Fase (B) relativo a equação 3.2

$$\epsilon_i = A \operatorname{sen} \left| \frac{2\pi}{\lambda} (\ell_i - B) \right| \quad (3.2)$$

onde: ϵ_i - é o erro cíclico da distância ℓ_i ;

A - amplitude do erro cíclico;

B - comprimento que corresponde a um ângulo de fase que pode ser obtido por: $\phi = \frac{2\pi B}{\lambda}$

ℓ_i - é o comprimento (u na figura 1) correspondente à diferença de fase obtida eletronicamente;

λ - comprimento em que a curva completa um ciclo e cor responde à metade do comprimento da onda de modulação fina do aparelho, sendo que na maioria dos instrumentos de MED é 20 m, logo $\lambda = 10$ m. (*)

Assim, através de uma calibração devem ser estimados os elementos definidores do erro cíclico, ou seja, a amplitude (A) e fase (B) correspondente. Para tal estimativa, é necessário a obtenção de distâncias convenientemente espaçadas dentro de dez metros (ou metade do comprimento da onda de modulação).

Com as considerações anteriores, tem-se definidos os erros sistemáticos, que devem ser determinados através da calibração dos equipamentos.

Na literatura, pode-se verificar diferentes recomendações quanto a calibração. Alguns autores recomendam que os elementos do erro cíclico devem ser determinados separadamente do erro de zero e fator de escala. Outros autores apresentam a determinação conjunta de todos os elementos de calibração.

A seguir será apresentado uma descrição minuciosa dos procedimentos de campo, modelos matemáticos e ajustamentos necessários à determinação destes elementos.

(*) Neste trabalho será considerada a equação (3.1), e às vezes, o ângulo de fase estará representado pelo correspondente B aqui denominado de fase.

III.2 MÉTODO PARA DETERMINAÇÃO RIGOROSA DOS ELEMENTOS DO ERRO CÍCLICO

Um método rigoroso para a determinação da amplitude(A) e fase(B) do erro cíclico, consiste na utilização de uma linha teste conforme Figura 5.

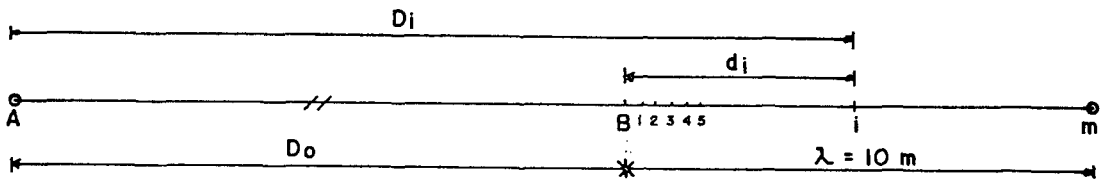


FIGURA-5_ Linha teste para determinação rigorosa do erro cíclico

As operações de campo consistem em colocar o aparelho no ponto A (figura 5) e registrar as distâncias medidas (D_i) entre este ponto e as posições 1, 2, ..., n, ao longo de uma linha horizontal, em que é possível medir com precisão, pequenos deslocamentos de um refletor que se locomove com facilidade sobre um trilho. Quanto menor for o espaçamento, melhor será a determinação.

Para o comprimento da distância D_o , tem-se diferentes recomendações, parecendo ser o mais indicado o da utilização de atenuadores que possibilitam a simulação das condições de medida para diferentes comprimentos.

Modelo matemático para o cálculo de A e B :

As observações podem ser expressas na forma paramétrica:

$$D_i + v_i = D_o + d_i + A \sin \left[\frac{2\pi}{\lambda} (d_i + B) \right] \quad (3.3)$$

tendo como parâmetros $\underline{D_o}$, \underline{A} e \underline{B} .

A parte não linear da equação (3.3) pode ser apresentada numa forma linear, simplesmente fazendo as seguintes modificações no modelo:

$$\epsilon_i = A \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} (d_i + B) \right) = A \sin \left(\frac{2\pi d_i}{\lambda} + \frac{2\pi B}{\lambda} \right)$$

chamando $\theta = \frac{2\pi d_i}{\lambda}$ e $\phi = \frac{2\pi B}{\lambda} = \text{ângulo de fase}$,

então: $\epsilon_i = A \sin(\theta + \phi) = A \sin \theta \cos \phi + A \cos \theta \sin \phi$

$\epsilon_i = \sin \theta \cdot A \cos \phi + \cos \theta \cdot A \sin \phi$; mas:

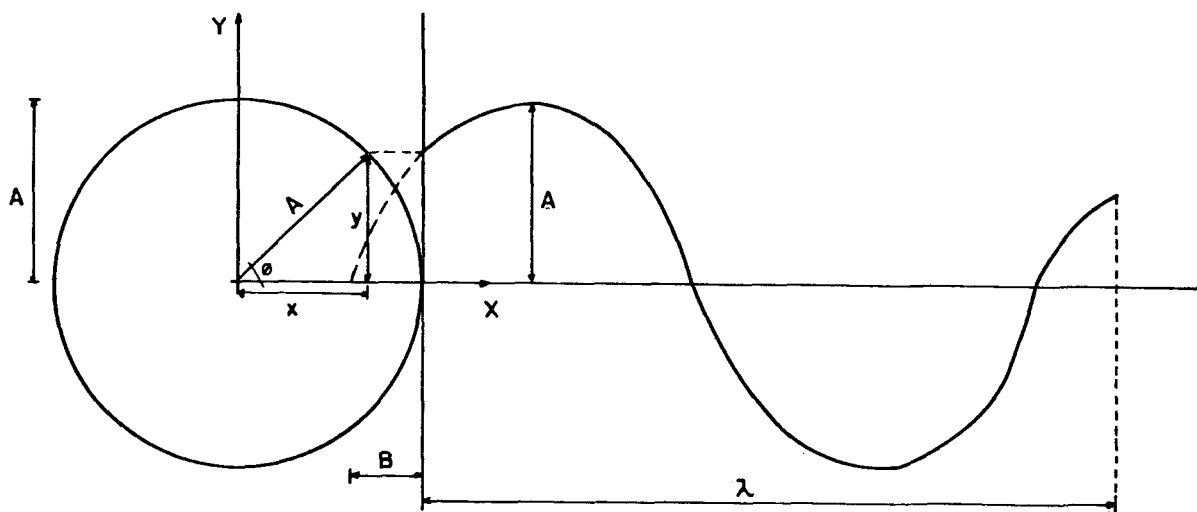


FIGURA-6. Erro cíclico

Pode-se fazer: $X = A \cos \phi$ e $P_i = \sin \theta_i$

$Y = A \sin \phi$ $Q_i = \cos \theta_i$

logo: $\epsilon_i = P_i X + Q_i Y \quad (3.4)$

e o modelo original ficará:

$$D_i + v_i = D_0 + d_i + P_i X + Q_i Y \quad (3.5)$$

E assim, através de um ajustamento pelo método dos mínimos quadrados, pode-se obter os parâmetros D_0 , X e Y .

Com X e Y obtêm-se:

$$A^2 = X^2 + Y^2 \quad (3.6)$$

$$\phi = \arctg \frac{Y}{X} \quad \text{ou} \quad \phi = 2 \arctg \frac{Y}{A+X} \quad \text{e} \quad B = \frac{\phi \lambda}{2\pi} \quad (3.7)$$

III.3 MÉTODO DA LINHA BASE DE CAMPO

Consiste basicamente de um alinhamento constituído de um certo número de pilares convenientemente espaçados, de forma a permitir a obtenção de um número redundante de observações.

Com este método é possível a determinação precisa da constante aditiva e fator de escala e uma boa estimativa dos elementos do erro cíclico. Para tornar possível esta estimativa da amplitude e fase do erro cíclico, a distribuição das estações ao longo da linha base, deve ser realizada obedecendo alguns critérios, conforme será elucidado posteriormente.

Se as distâncias interpilares não forem conhecidas, é possível a determinação apenas da constante aditiva e elementos

do erro cíclico.

III.3.1 ESTABELECIMENTO DA LINHA BASE:

O comprimento máximo da linha base é definido de forma a melhorar a determinação do fator de escala. RUEGER em [26], bem como outros autores, afirmam que a experiência tem mostrado não ser necessário trabalhar com linhas bases com extensão superior a 1 km.

Uma linha base ideal deve situar-se seguindo algumas recomendações (RUEGER em [26]):

1) a superfície do terreno deve ser plana ou ligeiramente côncava, de forma a possibilitar a intervisibilidade entre todas as estações;

2) ao longo de toda a linha base a irradiação do Sol deve ser a mesma durante o dia inteiro;

3) a vegetação deve ser rasteira e de pequeno crescimento;

4) deve ser orientada preferivelmente na direção Norte-Sul, permitindo medição com ou sem o Sol;

5) situar-se em local de fácil acesso;

6) preferivelmente, para permitir maior velocidade no transporte dos refletores entre as estações, deve situar-se ao lado de um caminho;

7) o acesso deve ser limitado ou não público, para evitar vandalismos e interrupções.

Quanto à distribuição das estações ao longo da linha base, pode-se verificar nas publicações sobre o assunto, dois diferentes conjuntos de critérios que orientam a escolha do espaçamento entre as estações, critérios estes que visam a possibilidade de determinação (ou detecção) dos elementos do erro cíclico. Estes são:

1º) Escolhe-se as posições dos pilares adotando como critério, uma boa distribuição das distâncias ao longo da metade do comprimento da onda de modulação básica dos principais instrumentos de MED.

Uma base construída seguindo este critério, é comumente denominada de linha base de Multi-pilares, e parece ser o tipo mais antigo e difundido, conforme pode-se ver em [2], [3], [4], [15], [26], [27], [29], etc.

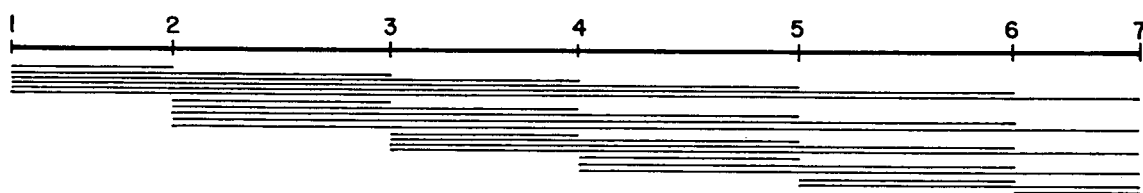


FIGURA-7_ Distâncias medidas numa linha base de multipilares

Desde que geralmente todas as combinações de distâncias sobre a linha base são medidas (veja Figura 7), o número de estações determina diretamente o número de observações redundan

tes. Muitas das bases existentes, conforme pode-se verificar na literatura, são construídas com 7 pilares, o que permite a obtenção de 21 observações com espaçamento, para a estimativa do erro cíclico, de meio em meio metro.

2º) Além da boa distribuição das distâncias, conforme o critério anterior, escolhe-se também os espaçamentos de forma que sempre haja pares de distâncias que diferem entre si, apenas a metade de um ciclo da curva do erro cíclico. Assim, se para os equipamentos a serem utilizados, este ciclo é 10m, o que é mais comum, deverá haver um número par de observações, existindo sempre duas que diferem entre si apenas 5 m.

Na literatura pesquisada, este conjunto de critérios foi obedecido, e até enunciado, por SPRENT & ZWART em [30] e [31]. A explicação para a sua adoção, bem como um estudo comparativo entre os dois conjuntos de critérios, será realizado no Capítulo V.

III.3.2 MODELOS MATEMÁTICOS

III.3.2.1 QUANDO AS DISTÂNCIAS SÃO CONHECIDAS

Uma equação de observação geral em que estão incorporados os vários erros sistemáticos presentes na MED, pode ser expressa da seguinte forma:

$$m(\sum \ell_j)_i + z_0 + A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}((\sum \ell_j)_i + B)\right) = L_{b_i} + v_i \quad (3.8)$$

onde: z_0 - erro de zero;

m - fator de escala;

A - amplitude do erro cíclico;

B - fase do erro cíclico;

ℓ_j ($j=1, \dots, k$) - distâncias inter-pilares (conhecidas);

L_{b_i} - i -ésima distância observada;

v_i - resíduo da i -ésima observação;

λ - metade do comprimento da onda de modulação;

k - número de seções.

Mas existe uma forte correlação (*) entre o erro de zero e a fase do erro cíclico, o que impede a utilização da equação (3.8) num ajustamento para a determinação simultânea de todos os elementos de calibração. Daí a necessidade de simplificações no modelo (3.8), para a determinação do erro de zero e fator de escala, separadamente dos elementos do erro cíclico.

Então, utiliza-se:

$$m(\sum_j \ell_j)_i + z_0 = L_{b_i} + V_i \quad (3.9)$$

Os resíduos $V_i(s)$, resultantes do ajustamento com o modelo (3.9), representarão não apenas erros aleatórios, mas também os erros cíclicos, ou:

(*) A forte correlação pode ser comprovada tentando-se fazer um ajustamento de observações considerando a equação (3.8), e obtendo-se os coeficientes de correlação.

$$V_i = v_i + A \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} ((\Sigma \ell_j)_i + B) \right) \quad (3.10)$$

Assim, o procedimento para a determinação de todos os elementos de calibração consiste em, num primeiro ajustamento com a equação (3.9), que é linear, determinar o erro de zero e fator de escala. Considera-se em seguida os resíduos deste ajustamento como sendo os erros cíclicos cometidos em cada distância, e faz-se um segundo ajustamento, ou:

$$\epsilon_i = V_i = A \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} ((\Sigma \ell_j)_i + B) \right) \quad (3.11)$$

Para este último ajustamento, o procedimento mais comum nas literaturas, é o desenvolvimento da equação (3.11) em séries de Fourier e realização de uma correspondente análise de Fourier. Entretanto, como poderá ser visualizado posteriormente, a realização de um ajustamento com a equação (3.11) na sua forma linear, apresenta resultados idênticos e com muito maior facilidade nos cálculos. Os dois procedimentos serão descritos a seguir.

III.3.2.1.1 DETERMINAÇÃO DOS ELEMENTOS DO ERRO CÍCLICO COM DESENVOLVIMENTO EM SÉRIES DE FOURIER:

Uma função $f(t)$, periódica, de período T pode ser desenvolvida em uma série trigonométrica denominada série de FOURIER:

$$f(t) = \frac{1}{2} a_0 + a_1 \cos \omega t + a_2 \cos 2\omega t + \dots + a_n \cos n\omega t +$$

$$+ b_1 \text{sen} \omega t + b_2 \text{sen} 2\omega t + \dots + b_n \text{sen} n\omega t \quad (3.12)$$

onde: $\omega = \frac{2\pi}{T}$ e os coeficientes podem ser obtidos por:

$$a_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cdot \cos(n\omega t) dt \quad (3.13)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) \cdot \text{sen}(n\omega t) dt \quad (3.14)$$

$$a_0 = \frac{2}{T} \int_{-\frac{T}{2}}^{\frac{T}{2}} f(t) dt \quad (3.15)$$

A equação (3.11) é uma função periódica, de período $T = 2\pi$, logo $\omega = 1$. Considerando \underline{A} e \underline{B} como constantes (desconhecidas), o erro cíclico (ϵ_i) será função de $(\Sigma \ell_j)_i$, e a equação (3.11) desenvolvida em série de Fourier, ficará:

$$\begin{aligned} \epsilon_i = f((\Sigma \ell_j)_i) = & \frac{1}{2} a_0 + a_1 \cos \frac{2\pi}{\lambda} (\Sigma \ell_j)_i + a_2 \cos 2 \frac{2\pi}{\lambda} (\Sigma \ell_j)_i + \dots \\ & + b_1 \text{sen} \frac{2\pi}{\lambda} (\Sigma \ell_j)_i + b_2 \text{sen} 2 \cdot \frac{2\pi}{\lambda} (\Sigma \ell_j)_i + \dots \end{aligned} \quad (3.16)$$

Aplicando a função (3.11) na integral da (3.15), tem-se que $a_0 = 0$, e chamando $\theta_i = \frac{2\pi}{\lambda} (\Sigma \ell_j)_i$, vem:

$$\begin{aligned} \epsilon_i = f(\theta_i) = & a_1 \cos \theta_i + a_2 \cos 2\theta_i + a_3 \cos 3\theta_i + \dots \\ & + b_1 \sin \theta_i + b_2 \sin 2\theta_i + b_3 \sin 3\theta_i + \dots \end{aligned} \quad (3.17)$$

Nas equações (3.13) e (3.14), para o cálculo dos coeficientes \underline{a}_n e \underline{b}_n , seria necessário o conhecimento de \underline{A} e \underline{B} que aparecem nas integrais, assim uma alternativa é a utilização do método dos mínimos quadrados na equação (3.17) para a obtenção dos coeficientes, e então com estes coeficientes, pode-se obter \underline{A} e o ângulo de fase (ϕ), utilizando-se as seguintes equações:

-Amplitude:

$$A_n^2 = a_n^2 + b_n^2 \quad (3.18)$$

-Ângulo de fase relativo à equação (3.1):

$$\phi_n = \arctg\left(\frac{a_n}{b_n}\right) \quad \text{ou} \quad \phi_n = 2\arctg\left(\frac{a_n}{A_n + b_n}\right) \quad (3.19)$$

-Ângulo de fase relativo à equação (3.2):

$$\phi_n = \arctg\left(\frac{b_n}{a_n}\right) \quad \text{ou} \quad \phi_n = 2\arctg\frac{b_n}{A_n + a_n} \quad (3.20)$$

para $n = 1, 2, 3, \dots$

Em [30] e [31], afirma-se que é suficiente considerar os 3 primeiros harmônicos e adotar o dominante. Na referência [30], sugere-se que seja tomado o harmônico cuja amplitude for o triplo (ou mais) dos outros, e se não houver esta diferença significativa, então provavelmente não há erro cíclico.

III.3.2.1.2 DETERMINAÇÃO DOS ELEMENTOS DO ERRO CÍCLICO COM A EQUAÇÃO DO ERRO CÍCLICO NA FORMA LINEAR:

O desenvolvimento da equação do erro cíclico para a forma linear, já foi realizado no ítem III-2. Ele nos permite chegar na seguinte equação "observação":

$$\epsilon_i = V_i = P_i X + Q_i Y \quad (3.21)$$

Por um ajustamento simples pelo método dos mínimos quadrados, obtém-se X e Y. Com estes pode-se obter a amplitude e o ângulo de fase do erro cíclico.

-Amplitude:

$$A^2 = X^2 + Y^2 \quad (3.22)$$

-Ângulo de fase relativo à equação (3.1):

$$\phi = \arctg\left(\frac{Y}{X}\right) \quad \text{ou} \quad \phi = 2\arctg\left(\frac{Y}{A+X}\right) \quad (3.23)$$

-Ângulo de fase relativo à equação (3.2):

$$\phi = \arctg\left(\frac{X}{Y}\right) \quad \text{ou} \quad \phi = 2\arctg\left(\frac{X}{A+Y}\right) \quad (3.24)$$

III.3.2.2 QUANDO AS DISTÂNCIAS NÃO SÃO CONHECIDAS:

Não sendo disponíveis as distâncias entre os pilares, torna-se impossível a determinação do fator de escala, e a equa

ção de observação para o primeiro ajustamento fica:

$$(\sum \ell_j)_i + z_0 = Lb_i + V_i \quad (3.25)$$

e o ajustamento é realizado considerando como parâmetros o erro de zero e as distâncias entre os pilares. Assim, se a linha ba se for constituída de sete pilares, os parâmetros serão os seis comprimentos das seções e o erro de zero.

Para a determinação dos elementos do erro cíclico, o ra ciocínio é o mesmo adotado para o caso anterior, diferindo apenas pelo fato de que, aqui é adotado no lugar das distâncias in ter-pilares conhecidas, as correspondentes distâncias ajustadas do primeiro ajustamento, ou

$$\varepsilon_i = V_i = A \operatorname{sen} \left(\frac{2\pi}{\lambda} ((\sum \ell_j^a)_i + B) \right) \quad (3.26)$$

sendo: ℓ_j^a , $j=1, \dots, 6$ — as distâncias inter-pilares ajustadas e obtidas no primeiro ajustamento.

IV. CÁLCULO DOS ELEMENTOS DE CALIBRAÇÃO DOS INSTRUMENTOS DE MED COM OBSERVAÇÕES DA LINHA BASE DE CAMPO

Afim de calcular os elementos de calibração dos instrumentos de MED com observações de linha base de campo, será realizado inicialmente uma descrição dos ajustamentos necessários, sem considerar limitações computacionais. Posteriormente, será feito um desenvolvimento das fórmulas do ajustamento, considerando possíveis simplificações para o cálculo simplesmente com calculadoras de bolso.

IV.1 AJUSTAMENTO DAS OBSERVAÇÕES

Como já foi mencionado no item III.3.2, obtém-se o fator de escala e erro de zero (ou apenas erro de zero) num ajustamento, e a amplitude e fase do erro cíclico em um outro ajustamento.

1º AJUSTAMENTO

-Quando as distâncias inter-pilares são conhecidas:

A equação da i-ésima observação pode ser apresentada como:

$$mLc_i + z_0 = Lb_i + v_i \quad (4.1)$$

Considerando todas as observações, pode-se representar matricialmente por:

$$AX - L_B = V \quad (4.2)$$

onde: A - matriz ($n \times 2$) dos coeficientes das incógnitas;

X - vetor (2×1) das incógnitas (\underline{m} e $\underline{z_0}$);

L_B - vetor ($n \times 1$) das observações;

V - vetor ($n \times 1$) dos resíduos;

n - número de observações.

Aplicando o método dos mínimos quadrados ao sistema (4.2), a solução poderá ser obtida por:

$$X = (A^T P A)^{-1} A^T P L_B \quad (4.3)$$

sendo P a matriz dos pesos das observações que, assumindo as observações sem correlação, será uma matriz diagonal, cujos elementos podem ser obtidos por:

$$p_{ii} = \sigma_o^2 \cdot \frac{1}{\sigma_{L_{b_i}}^2} \quad (4.4)$$

Com o resultado da (4.3), resolve-se a (4.2) e obtém-se o valor de $\hat{\sigma}_o^2$ (variância da observação de peso unitário a posteriori):

$$\hat{\sigma}_o^2 = \frac{V^T P V}{g\ell} \quad (4.5)$$

sendo $g\ell$ o grau de liberdade do ajustamento.

A matriz variância-covariância das incôgnitas (parâmetros), é obtida por:

$$\Sigma_X = \hat{\sigma}_0^2 (A^T P A)^{-1} \quad (4.6)$$

Afim de testar a qualidade do ajustamento, pode-se fazer uma comparação do sigma zero a priori (σ_0^2) com o a posteriori ($\hat{\sigma}_0^2$), conforme recomendação de GEMAEL em [17]. Se houver discrepância entre σ_0^2 e $\hat{\sigma}_0^2$, aplica-se um teste de hipótese baseado na distribuição de Qui-quadrado (χ^2) para constatar se a discrepância é significativa a um certo nível de confiança.

Assim, pode-se testar uma hipótese básica:

$$H_0: \sigma_0^2 = \hat{\sigma}_0^2$$

contra uma hipótese alternativa:

$$H_1: \sigma_0^2 \neq \hat{\sigma}_0^2 .$$

Para a aceitação da hipótese básica, o Qui-quadrado amostral, fornecido por:

$$\chi^2 = \frac{\hat{\sigma}_0^2}{\sigma_0^2} \cdot g_l \quad (4.7)$$

deverá estar compreendido entre os valores teóricos

$$\chi_{g_l, \frac{\alpha}{2}}^2 \quad \text{e} \quad \chi_{g_l, 1-\frac{\alpha}{2}}^2 .$$

-Quando as distâncias inter-pilares não são conhecidas:

A equação da i-ésima observação pode ser apresentada como:

$$(\sum l_j)_i + z_o = L_{b_i} + V_i \quad (4.8)$$

e também pode ser representada matricialmente por:

$$AX - LB = V \quad (4.9)$$

sendo:

A - matriz (n x k) dos coeficientes das incógnitas;

X - vetor (k x 1) das incógnitas (parâmetros). Os parâmetros serão o erro de sero e distâncias inter-pilares.

A variância da observação de peso unitário a posteriori ($\hat{\sigma}_o^2$) pode ser obtida pela equação (4.5) e o Qui-quadrado amostral pela (4.7).

2º AJUSTAMENTO (obtenção da amplitude e fase do erro cíclico)

Como já foi mencionado no item III.3.2, os elementos do erro cíclico podem ser obtidos através de um ajustamento com desenvolvimento em série de Fourier ou simplesmente com a equa

ção linear do erro cíclico.

a) Com desenvolvimento em série de Fourier:

A equação da i-ésima observação pode ser apresentada co
mo:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i = & a_1 \cos \theta_i + a_2 \cos 2\theta_i + a_3 \cos 3\theta_i + \dots \\ & + b_1 \sin \theta_i + b_2 \sin 2\theta_i + b_3 \sin 3\theta_i \end{aligned} \quad (4.10)$$

O modelo é linear e pode ser representado matricialmen-
te por:

$$AX - E = V \quad (4.11)$$

onde: A - matriz (nx6) dos coeficientes das incógnitas;

X - vetor (6x1) das incógnitas ($a_1, a_2, a_3, b_1, b_2, b_3$);

E - vetor (nx1) dos erros cíclicos (resíduos do primei-
ro ajustamento);

V - vetor (nx1) dos resíduos;

n - número de observações.

Aplicando o método dos mínimos quadrados ao sistema (4.11),
a solução poderá ser obtida por:

$$X = (A^T P A)^{-1} A^T P E \quad (4.12)$$

sendo que a matriz dos pesos (P) pode ser obtida por:

$$P = \sigma_0^2 \Sigma_E^{-1} \quad (4.13)$$

Os elementos do vetor \underline{E} são os resíduos do primeiro ajustamento, logo, considerando $\underline{L_A}$ e $\underline{L_B}$ os vetores das observações ajustadas e medidas respectivamente, temos:

$$\underline{E} = \underline{L_A} - \underline{L_B} \quad (4.14)$$

e

$$\Sigma_{\underline{E}} = \Sigma_{\underline{L_B}} - \Sigma_{\underline{L_A}} \quad (4.15)$$

sendo que a matriz variância-covariância das observações ajustadas, pode ser obtida por:

$$\Sigma_{\underline{L_A}} = \sigma_o^2 \underline{A} (\underline{A^T P A})^{-1} \underline{A^T} \quad (4.16)$$

Com o resultado da (4.12), resolve-se a (4.11) e obtém-se o valor de $\hat{\sigma}_o^2$ com a equação (4.5).

A matriz variância-covariância das incógnitas (coeficientes da série de Fourier), é obtida por:

$$\Sigma_X = \hat{\sigma}_o^2 (\underline{A^T P A})^{-1}$$

Como são de interesse a amplitude (\underline{A}) e fase ($\underline{\phi}$ ou \underline{B}) do erro cíclico, faz-se:

-Amplitude:

$$A_k = (a_k^2 + b_k^2)^{\frac{1}{2}} \quad (4.17)$$

e

$$\sigma_{A_k}^2 = \frac{a_k^2}{A_k^2} \sigma_{a_k}^2 + \frac{b_k^2}{A_k^2} \sigma_{b_k}^2 \quad (4.18)$$

-Fase:

$$\phi_k = \arctg\left(\frac{a_k}{b_k}\right) \quad (4.19)$$

e

$$\sigma_{\phi_k}^2 = \frac{a_k^2}{A_k^4} \sigma_{b_k}^2 + \frac{b_k^2}{A_k^4} \sigma_{a_k}^2 \quad (4.20)$$

$$B_k = \frac{\phi_k \cdot \lambda}{2\pi} \quad (4.21)$$

$$\sigma_{B_k}^2 = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 \sigma_{\phi_k}^2 \quad (4.22)$$

b) Com a equação linear do erro cíclico:

A equação da i-ésima observação pode ser apresentada co
mo:

$$\epsilon_i = P_i \cdot X + Q_i \cdot Y \quad (4.23)$$

Matricialmente, tem-se:

$$AX - E = V \quad (4.24)$$

onde: A - matriz (nx2) dos coeficientes das incógnitas;

X - vetor (2x1) das incógnitas (X e Y).

O raciocínio para a obtenção da solução é o mesmo do caso anterior.

Para a obtenção da amplitude e fase, faz-se:

-Amplitude:

$$A = (X^2 + Y^2)^{\frac{1}{2}}$$

$$\sigma_A^2 = \frac{X^2}{A^2} \sigma_x^2 + \frac{Y^2}{A^2} \sigma_y^2 \quad (4.25)$$

-Fase:

$$\phi = \arctg \left(\frac{Y}{X} \right)$$

$$\sigma_\phi^2 = \frac{Y^2}{A^4} \sigma_x^2 + \frac{X^2}{A^4} \sigma_y^2 \quad (4.26)$$

e
$$B = \frac{\phi \lambda}{2\pi}$$

$$\sigma_B^2 = \left(\frac{\lambda}{2\pi} \right)^2 \sigma_\phi^2 \quad (4.27)$$

IV.2 CÁLCULO COM CALCULADORAS DE BOLSO:

Adotando-se algumas simplificações, pode-se obter estimativas para os elementos de calibração dos instrumentos de MED

simplesmente com o uso de calculadoras de bolso. Com este objetivo, será realizado um desenvolvimento do método dos mínimos quadrados no modelo do erro de zero e fator de escala, e no modelo do erro cíclico.

IV.2.1 CÁLCULO DO ERRO DE ZERO E FATOR DE ESCALA

Para a i -ésima observação (L_i), sendo conhecida a correspondente distância padrão (D_i), tem-se que:

$$z_0 + mD_i = L_i \quad (4.28)$$

Matricialmente, tem-se:

$$\begin{vmatrix} 1 & D_1 \\ 1 & D_2 \\ \vdots & \vdots \\ 1 & D_n \end{vmatrix} \begin{vmatrix} z_0 \\ m \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} L_1 \\ L_2 \\ \vdots \\ L_n \end{vmatrix} \quad \text{ou} \quad AX = L$$

Afim de facilitar os cálculos, pode-se considerar todas observações com o mesmo peso.

Pelo método dos mínimos quadrados, faz-se $A^T AX = A^T L$, e como resultado dessas operações matriciais, vem:

$$\begin{vmatrix} n & \Sigma D_i \\ \Sigma D_i & \Sigma D_i^2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} z_0 \\ m \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \Sigma L_i \\ \Sigma D_i L_i \end{vmatrix} \quad \text{ou} \quad NX = U$$

Para resolver este sistema de equações normais, pode-se fazer:

$$N^{-1} \cdot N X = N^{-1} U \quad \text{e} \quad X = N^{-1} U$$

A inversa da matriz normal, será:

$$N^{-1} = \frac{1}{\text{DET}} \begin{vmatrix} \Sigma D_i^2 & -\Sigma D_i \\ -\Sigma D_i & n \end{vmatrix} \quad \text{onde } \text{DET} = n \Sigma D_i^2 - (\Sigma D_i)^2$$

e a solução:

$$z_0 = \frac{\Sigma D_i^2 \cdot \Sigma L_i - \Sigma D_i \cdot \Sigma D_i L_i}{n \Sigma D_i^2 - (\Sigma D_i)^2} \quad (4.29)$$

$$m = \frac{n \Sigma D_i L_i - \Sigma D_i \cdot \Sigma L_i}{n \Sigma D_i^2 - (\Sigma D_i)^2} \quad (4.30)$$

As distâncias observadas corrigidas do erro de zero e escala, serão:

$$L_{Ci} = \frac{1}{m} (L_i - z_0) \quad (4.31)$$

O resíduo de cada observação, será:

$$v_i = D_i - L_{Ci}; \quad \text{ou} \quad v_i = D_i - \frac{1}{m}(L_i - z_0) \quad (4.32)$$

Determinação da precisão de z_0 e m :

A matriz variância-covariância de z_0 e m pode ser obti-

da por:

$$\Sigma_{z_0 m} = \hat{\sigma}_0^2 N^{-1}$$

O valor do $\hat{\sigma}_0^2$ no presente caso em que se tem \underline{n} observações e 2 incógnitas, pode ser obtido por:

$$\hat{\sigma}_0^2 = \frac{\Sigma v_i^2}{n-2}$$

e a variância de $\underline{z_0}$ e \underline{m} , serão:

$$\sigma_{z_0}^2 = \frac{\hat{\sigma}_0^2 \Sigma D_i^2}{n \Sigma D_i^2 - (\Sigma D_i)^2} \quad (4.33)$$

$$\sigma_m^2 = \frac{\hat{\sigma}_0^2 \cdot n}{n \Sigma D_i^2 - (\Sigma D_i)^2} \quad (4.34)$$

a covariância:

$$\sigma_{m z_0} = \frac{-\hat{\sigma}_0^2 \cdot \Sigma D_i}{n \Sigma D_i^2 - (\Sigma D_i)^2}$$

Para a obtenção de Σv_i^2 , pode-se também fazer um desenvolvimento análogo ao que será realizado no ítem IV-2.2, e chegar na seguinte fórmula:

$$\Sigma v_i^2 = \Sigma L^2 - m \Sigma D \cdot L - z_0 \Sigma L \quad (4.35)$$

IV.2.2 CÁLCULO DOS ELEMENTOS DO ERRO CÍCLICO.

Para a determinação da amplitude e fase do erro cíclico,

considera-se os resíduos resultantes do ajustamento realizado para a determinação de z_0 e m .

A equação para a i -ésima observação, será:

$$P_i X + Q_i Y = v_i \quad (4.36)$$

onde: X e Y são incógnitas, e

$$P_i = \sin\left(\frac{2\pi D_i}{\lambda}\right) \quad Q_i = \cos\left(\frac{2\pi D_i}{\lambda}\right)$$

O sistema de equações superabundantes, será:

$$\begin{vmatrix} P_1 & Q_1 \\ P_2 & Q_2 \\ \vdots & \vdots \\ P_n & Q_n \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X \\ Y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_n \end{vmatrix} \quad \text{ou} \quad AZ = L$$

Pelo método dos mínimos quadrados, faz-se $A^T A X = A^T L$, e como resultado dessas operações matriciais, tem-se

$$\begin{vmatrix} \sum P_i^2 & \sum P_i Q_i \\ \sum P_i Q_i & \sum Q_i^2 \end{vmatrix} \begin{vmatrix} X \\ Y \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} \sum P_i v_i \\ \sum Q_i v_i \end{vmatrix} \quad \text{ou} \quad NZ = U$$

A inversa da matriz normal N^{-1} , será:

$$N^{-1} = \frac{1}{\text{DET}} \begin{vmatrix} \sum Q_i^2 & -\sum P_i Q_i \\ -\sum P_i Q_i & \sum P_i^2 \end{vmatrix} \quad \text{onde} \quad \text{DET} = \sum P_i^2 \cdot \sum Q_i^2 - (\sum P_i Q_i)^2$$

e a solução será:

$$X = \frac{\sum Q_i^2 \cdot \sum P_i v_i - \sum P_i Q_i \cdot \sum Q_i v_i}{\sum P_i^2 \cdot \sum Q_i^2 - (\sum P_i Q_i)^2} \quad (4.37)$$

$$Y = \frac{\sum P_i^2 \cdot \sum Q_i v_i - \sum P_i Q_i \cdot \sum P_i v_i}{\sum P_i^2 \cdot \sum Q_i^2 - (\sum P_i Q_i)^2} \quad (4.38)$$

-Amplitude:

$$A^2 = X^2 + Y^2$$

-Ângulo de fase:

$$\phi = \arctg \frac{Y}{X}$$

e após a investigação do quadrante em que está situado o ângulo de fase, pode-se determinar o comprimento de fase correspondente, ou:

$$B = \frac{\lambda \cdot \phi}{2\pi}$$

Determinação da precisão dos elementos do erro cíclico:

Afim de facilitar a obtenção de Σv^2 , seja as seguintes considerações:

O sistema de equações normais nos conduz a:

$$X\Sigma P^2 + Y\Sigma PQ = \Sigma PV$$

$$X\Sigma PQ + Y\Sigma Q^2 = \Sigma QV , \quad \text{ou}$$

$$\Sigma P^2 = \frac{\Sigma PV - Y\Sigma PQ}{X} \quad (4.39)$$

$$\Sigma Q^2 = \frac{\Sigma QV - X\Sigma PQ}{Y} \quad (4.40)$$

Com as equações originais (4.36), pode-se fazer:

$$\Sigma v^2 = (P_1 X + Q_1 Y - V_1)^2 + (P_2 X + Q_2 Y - V_2)^2 + \dots$$

desenvolvendo, vem:

$$\begin{aligned} \Sigma v^2 = & P_1^2 X^2 + Q_1^2 Y^2 + V_1^2 + P_1 Q_1 XY - P_1 V_1 X + P_1 Q_1 XY - \\ & - Q_1 V_1 Y - P_1 V_1 X - Q_1 V_1 Y + \dots \end{aligned}$$

$$\Sigma v^2 = X^2 \Sigma P^2 + Y^2 \Sigma Q^2 + \Sigma v^2 + 2XY\Sigma PQ - 2X\Sigma PV - 2Y\Sigma QV .$$

Considerando (4.39) e (4.40):

$$\begin{aligned} \Sigma v^2 = & X\Sigma PV - XY\Sigma PQ + Y\Sigma QV - XY\Sigma PQ + \Sigma v^2 + \\ & + 2XY\Sigma PQ - 2X\Sigma PV - 2Y\Sigma QV \end{aligned}$$

$$\Sigma v^2 = \Sigma v^2 - X\Sigma PV - Y\Sigma QV \quad (4.41)$$

e então pode-se obter:

$$\hat{\sigma}_o^2 = \frac{\sum v_i^2}{n-2}$$

As variâncias dos parâmetros serão:

$$\sigma_X^2 = \frac{\hat{\sigma}_o^2 \sum Q_i^2}{\sum P^2 \cdot \sum Q - (\sum PQ)^2} \quad (4.42)$$

$$\sigma_Y^2 = \frac{\hat{\sigma}_o^2 \sum P^2}{\sum P^2 \cdot \sum Q^2 - (\sum PQ)^2} \quad (4.43)$$

e a covariância

$$\sigma_{XY} = \frac{-\hat{\sigma}_o^2 \cdot \sum P \cdot Q}{\sum P^2 \cdot \sum Q^2 - (\sum PQ)^2} \quad (4.44)$$

Mas são de interesse as variâncias de A e B, logo:

$$\sigma_A^2 = \frac{X^2}{A^2} \sigma_X^2 + \frac{Y^2}{A^2} \sigma_Y^2$$

$$\sigma_\phi^2 = \frac{X^2}{A^4} \sigma_Y^2 + \frac{Y^2}{A^4} \sigma_X^2$$

$$\sigma_B^2 = \left(\frac{\lambda}{2\pi}\right)^2 \sigma_\phi^2$$

Com as fórmulas desenvolvidas anteriormente, pode-se facilmente determinar os elementos de calibração dos instrumentos de MED fazendo uso de calculadoras de bolso. No Apêndice 2 encontra-se a listagem de um programa preparado para a calculadora PC-1211RP da SHARP.

V. ESTUDO COMPARATIVO ENTRE CRITÉRIOS DE DISTRIBUIÇÃO DOS PILARES NAS LINHAS BASES DE CAMPO:

V.1 TESTES COM SIMULAÇÃO DE DADOS:

Como foi mencionado no ítem III-3.1, na literatura disponível, encontram-se dois diferentes conjuntos de critérios que devem ser obedecidos na distribuição dos pilares das linhas bases de calibração.

Afim de verificar estes critérios, será realizado um estudo baseado em observações simuladas, já que não tem-se disponíveis observações reais que permitam uma boa comparação.

As distâncias "observadas" (fictícias) (" L_b "), serão obtidas a partir da introdução de erros sistemáticos em distâncias consideradas conhecidas (L_{c_i}), com a utilização da equação:

$$"L_{b_i}" = m L_{c_i} + z_0 - A \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}(L_{c_i} + B)\right) \quad (5.1)$$

Com as distâncias consideradas conhecidas e as correspondentes distâncias "observadas", serão realizados ajustamentos para a obtenção dos erros sistemáticos, que, devido a simulação, já são conhecidos a priori.

A seguir, serão apresentados alguns exemplos de linhas

bases.

a) Seja inicialmente uma linha base de multipilares , contendo 7 pilares, que sendo considerado todas combinações de distâncias, nos produz 21 observações.

Supondo os seguintes erros sistemáticos:

-fator de escala $m = 0,99995$;

-erro de zero $z_0 = 0,050$ m;

-erro cíclico: amplitude $A = 0,030$ m
fase $B = 8,000$ m

Obs.: comprimento da onda de modulação igual a 20 m, ou $\lambda = 10$ m.

Na Tabela 4, foram colocados além das distâncias conhecidas e "observadas", os erros cíclicos e resíduos do 1º ajustamento (ou ajustamento para a determinação do erro de zero e fator de escala).

Realizando-se os ajustamentos e considerando todas as observações com o mesmo peso, chega-se nos seguintes resultados:

$$z_0 = 0,0549 \text{ m} \pm 0,0060 \text{ m}$$

$$m = 0,9999389 \pm 0,0000115$$

$$A = 0,0292 \text{ m} \pm 0,0008 \text{ m}$$

$$B = 7,7998 \text{ m} \pm 0,0013 \text{ m}$$

	distâncias conhecidas L_{Ci}	distâncias "observadas" " L_{bi} "	erro cíclico (mm)	resíduos 1º ajustamento (mm)
1	19,5	19,5790	-30,0	-25,3
2	58,5	58,5713	-24,3	-20,0
3	126,5	126,5344	9,3	13,0
4	254,0	254,0087	28,5	30,7
5	510,0	510,0530	-28,5	-29,3
6	1021,5	1021,5082	- 9,3	-15,7
7	39,0	39,0766	-28,5	-24,1
8	107,0	107,0446	0,0	3,8
9	234,5	234,5083	30,0	32,3
10	490,5	490,5497	-24,3	-24,8
11	1002,0	1001,9999	0,0	- 6,2
12	68,0	68,0642	-17,6	-13,4
13	195,5	195,5160	24,3	26,9
14	451,5	451,5367	- 9,3	- 9,4
15	963,0	962,9842	17,6	11,9
16	127,5	127,5529	- 9,3	- 5,8
17	383,5	383,5066	24,3	24,9
18	895,0	894,9767	28,5	23,5
19	256,0	256,0196	17,6	19,6
20	771,0	771,0291	-17,6	-21,3
21	512,5	512,5151	9,3	8,5

TABELA 4

b) Seja uma linha base que possibilita a obtenção de pares de distâncias diferindo a metade do meio comprimento da onda de modulação.

b_1) Supondo inicialmente apenas 10 distâncias, o que leva a estimativa dos elementos do erro cíclico com espaçamento de 1,0 em 1,0 metro.

As observações fictícias serão obtidas considerando os mesmos erros sistemáticos do caso anterior. (Tabela 5)

	DISTÂNCIAS CONHECIDAS L_c	DISTÂNCIAS "OBSERVADAS" " L_b "	ERRO CÍCLICO (mm)	RESÍDUOS 1º AJUSTAMENTO (mm)
1	123,0	123,0262	17,6	17,6
2	118,0	118,0617	-17,6	-17,6
3	231,0	231,0561	-17,6	-17,6
4	226,0	226,0211	17,6	17,6
5	359,0	359,0606	-28,5	-28,5
6	354,0	354,0038	28,5	28,5
7	477,0	477,0262	0,0	0,0
8	472,0	472,0264	0,0	0,0
9	595,0	594,9917	28,5	28,5
10	590,0	590,0490	-28,5	-28,5

TABELA 5

Resultados dos ajustamentos:

$$z_0 = 0,0500 \text{ m} \pm 0,0183 \text{ m}$$

$$m = 0,9999500 \pm 0,0000465$$

$A = 0,0300 \text{ m} \pm 0,00001 \text{ m}$
 $B = 8,0005 \text{ m} \pm 0,0000003 \text{ m}$

b₂) Supondo 20 distâncias, ou seja, estimativa dos elementos do erro cíclico com espaçamento de 0,5 em 0,5 metro.

	DISTÂNCIAS CONHECIDAS L _c	DISTÂNCIAS "OBSERVADAS" "L _b "	ERRO CÍCLICO (mm)	RESÍDUOS 1º AJUSTAMENTO
1	123,0	123,0262	17,6	17,6
2	118,0	118,0617	-17,6	-17,6
3	231,0	231,0561	-17,6	-17,6
4	226,0	226,0211	17,6	17,6
5	359,0	359,0606	-28,6	-28,6
6	354,0	354,0038	28,6	28,6
7	477,0	477,0262	0,0	0,0
8	472,0	472,0264	0,0	0,0
9	595,0	594,9917	28,5	28,5
10	590,0	590,0490	-28,5	-28,5
11	31,5	31,5577	- 9,3	- 9,3
12	36,5	36,5389	9,3	9,3
13	72,5	72,5371	9,3	9,3
14	77,5	77,5554	- 9,3	- 9,3
15	653,5	653,4930	24,3	24,3
16	658,5	658,5413	-24,3	-24,3
17	784,5	784,4808	30,0	30,0
18	789,5	789,5405	-30,0	-30,0
19	830,5	830,5327	-24,3	-24,3
20	835,5	835,4839	24,3	24,3

TABELA 6

Resultados dos ajustamentos:

$z_o = 0,0500 \text{ m} \pm 0,0073 \text{ m}$
 $m = 0,9999500 \pm 0,0000146 \text{ m}$
 $A = 0,0300 \text{ m} \pm 0,00001 \text{ m}$
 $B = 8,0003 \text{ m} \pm 0,0000003 \text{ m}$

c) Seja a linha base de multi-pilares, cujas observações estão isentas de erros cíclicos, ou: $z_o = 0,050 \text{ m}$
 $m = 0,99995$
 $A \cong 0$

DISTÂNCIAS CONHECIDAS L _c		DISTÂNCIAS "OBSERVADAS" "L _b "		DISTÂNCIAS CONHECIDAS L _c		DISTÂNCIAS "OBSERVADAS" "L _b "	
1	19,5	19,5490	11	1002,0	1001,9999		
2	58,5	58,5471	12	68,0	68,0466		
3	126,5	126,5437	13	195,5	195,5402		
4	254,0	254,0373	14	451,5	451,5274		
5	510,0	510,0245	15	963,0	963,0018		
6	1021,5	1021,4989	16	127,5	127,5436		
7	39,0	39,0480	17	383,5	383,5308		
8	107,0	107,0446	18	895,0	895,0052		
9	234,5	234,5383	19	256,0	256,0372		
10	490,5	490,5255	20	771,0	771,0114		
			21	512,5	512,5244		

TABELA 7

Baseando-se nos exemplos anteriores, e denominando as linhas bases de multi-pilares de TIPO 1, e as dos pares de distân

cias que diferem a metade do meio comprimento da onda de modulação de TIPO 2, pode-se concluir que:

-A determinação do erro de zero e fator de escala com observações da linha base TIPO 1, é influenciada pela presença do erro cíclico, e o mesmo não ocorre com observações da linha base TIPO 2.

-Os resíduos provenientes do ajustamento para a determinação do erro de zero e fator de escala com observações da linha base TIPO 2, não considerando erros aleatórios, correspondem aos erros cíclicos, isto com melhor aproximação do que para a linha base TIPO 1. Como consequência, tem-se que a determinação dos elementos do erro cíclico com dados da linha base TIPO 2 é bem mais razoável.

-Uma linha base TIPO 2 com apenas 10 observações (exemplo b_1) já apresenta ótimos resultados, e aumentando o número de observações (exemplo b_2), os resultados apenas apresentaram maior precisão.

-A determinação do erro de zero e fator de escala com a utilização da linha base TIPO 1, apresenta bons resultados (exemplo c) se as observações forem isentas de erros cíclicos.

SPRENT e ZWART, que apresentam os critérios para o estabelecimento da linha base TIPO 2 [30] e [31], afirmam que os resultados obtidos na prática comprovam o que ocorre na teoria.

Embora as linhas bases TIPO 2 apresentem vantagens quanto

a obtenção dos resultados, ao construir uma linha base deve-se considerar o fato de que existem equipamentos com diferentes comprimentos da onda de modulação fina, e as linhas bases deste tipo são específicas, ou apresentam melhores resultados, apenas para o equipamento que possua um determinado comprimento da onda de modulação. Assim, para construir uma linha base, deve-se verificar quais equipamentos serão calibrados.

VI. MEDIÇÕES NA LINHA BASE DE CALIBRAÇÃO DA UFPR

VI.1 A LINHA BASE DA UFPR

É uma linha base tipo multi-pilares e está situada no próprio campus da Universidade (Fazenda Experimental - distante aproximadamente 15 km do centro da cidade de Curitiba). É constituída de sete pilares de concreto devidamente espaçados numa linha reta de aproximadamente 800 m localizada ao lado de um caminho que permite fácil locomoção entre os pilares.

Os pilares foram construídos considerando a possibilidade de utilização de dispositivos de centragem forçada ou bases de centragem simples.

VI.2 OPERAÇÕES DE CAMPO

Trata-se das primeiras medições realizadas na linha base da UFPR, por isto foi necessário a execução de trabalhos adicionais, além das medições com os distanciômetros. Estes trabalhos consistiram na determinação dos desníveis entre os pontos materializados nos pilares e a tentativa de obtenção das distâncias entre os pilares com alta precisão.

Para a obtenção dos desníveis, repetiu-se o nivelamento topográfico duas(2) vezes, utilizando-se o nível NI050 da CARL

ZEISS JENA (Nº 504327) e as miras centimétricas nº 1063 e 1066. Os desníveis médios são apresentados na Tabela 8.

DESNÍVEIS MÉDIOS	
1 - 2	-0,918 m
2 - 3	-2,004
3 - 4	0,598
4 - 5	0,485
5 - 6	1,436
6 - 7	0,608

TABELA 8 - Desníveis entre os pilares

Embora os desníveis pudessem ser obtidos com simples nivelamentos topográficos, o mesmo não acontece com as distâncias entre os pilares, já que estas devem ser obtidas com precisão superior às oferecidas com os distanciômetros. Assim, foi feita uma tentativa de obtenção destas distâncias com equipamentos disponíveis na UFPR. Foram realizadas medidas, seguindo as recomendações para obtenção de alta precisão, com 4 fitas de invar de 50 m de comprimento. Porém, como as distâncias entre os pilares não são múltiplas de 50 m, foi necessário utilizar um outro método afim de se obter as distâncias complementares, e para isto foi utilizado uma mira horizontal de invar. Após as referidas medições, constatou-se que os resultados oferecidos com a mira horizontal de invar não confirmava a expectativa, e resolveu-se não considerar as distâncias resultantes para a verificação de escala dos distanciômetros.

Realizou-se medidas com dois distanciômetros. Para a centagem dos equipamentos foram utilizadas as bases simples.

VI.2.1 ELTA 2 DA ZEISS

Características:

- . Onda portadora: infravermelho ($\lambda = 0,910 \mu\text{m}$);
- . Comprimento da onda de modulação fina: $\lambda = 20 \text{ m}$;
- . Precisão nominal: $\pm (5 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$.

As medidas meteorológicas foram realizadas apenas em uma das extremidades das linhas, e foi utilizado:

- um altímetro Paulin nº EF0585;
- um psicrômetro.

Todas as distâncias foram medidas em ida e volta, e cada medição foi definida a partir de três(3) leituras.

Repetiu-se as operações de campo em três(3) dias diferentes e observou-se uma normalidade nos resultados. As distâncias reduzidas das condições meteorológicas e inclinação das visadas estão apresentadas na Tabela 9.

PONTOS	DISTÂNCIAS MÉDIAS		
	1º LEVANTAMENTO	2º LEVANTAMENTO	3º LEVANTAMENTO
1-2	70,8725 m	70,8672 m	70,8629 m
1-3	222,7906	222,7950	222,7899
1-4	385,8512	385,8509	385,8495
1-5	648,2506	648,2477	648,2472
1-6	759,6752	759,6754	759,6742
1-7	789,9138	789,9115	789,9129
2-3	151,9268	151,9294	151,9279
2-4	314,9863	314,9918	314,9912
2-5	577,3856	577,3848	577,3876
2-6	688,8084	688,8140	688,8146
2-7	719,0459	719,0516	719,0530
3-4	163,0611	163,0658	163,0643
3-5	425,4704	425,4670	425,4680
3-6	536,8908	536,8933	536,8917
3-7	567,1288	567,1298	567,1302
4-5	262,4095	262,4088	262,4050
4-6	373,8386	373,8396	373,8372
4-7	404,0752	404,0778	404,0756
5-6	111,4317	111,4301	111,4289
5-7	141,6684	141,6701	141,6705
6-7	30,2328	30,2259	30,2339

TABELA 9 - Resultados obtidos em três levantamentos com o ELTA 2.

VI.2.2 TELURÔMETRO MA100

Características:

- . Onda portadora: infravermelho ($\lambda = 0,930 \mu\text{m}$)
- . Precisão: $\pm (1,5 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$

As medidas meteorológicas foram realizadas apenas em uma das extremidades das linhas, e foi utilizado:

- um altímetro Paulin nº EF0585;
- um psicrômetro marca TM.

Todas as distâncias foram medidas em ida e volta, e cada medição foi definida a partir de três leituras.

Repetiu-se as operações de campo em dois dias diferentes e observou-se uma normalidade nos resultados. As distâncias reduzidas das condições meteorológicas e inclinação das visadas estão apresentadas na Tabela 10.

PONTOS	DISTÂNCIAS MÉDIAS	
	1º LEVANTAMENTO	2º LEVANTAMENTO
1-2	70,9396 m	70,9434 m
1-3	222,8580	222,8434
1-4	385,9163	385,9098
1-5	648,3146	648,3099
1-6	759,7455	759,7386
1-7	789,9778	789,9784
2-3	151,9878	151,9832
2-4	315,0484	315,0453
2-5	577,4479	577,4475
2-6	688,8769	688,8757
2-7	719,1187	719,1194
3-4	163,1245	163,1230
3-5	425,5279	425,5282
3-6	536,9528	536,9581
3-7	567,1947	567,1962
4-5	262,4713	262,4724
4-6	373,9015	373,8998
4-7	404,1416	404,1401
5-6	111,4974	111,4909
5-7	141,7393	141,7344
6-7	30,3182	30,3088

TABELA 10 - Resultados obtidos em dois levantamentos com o MA100.

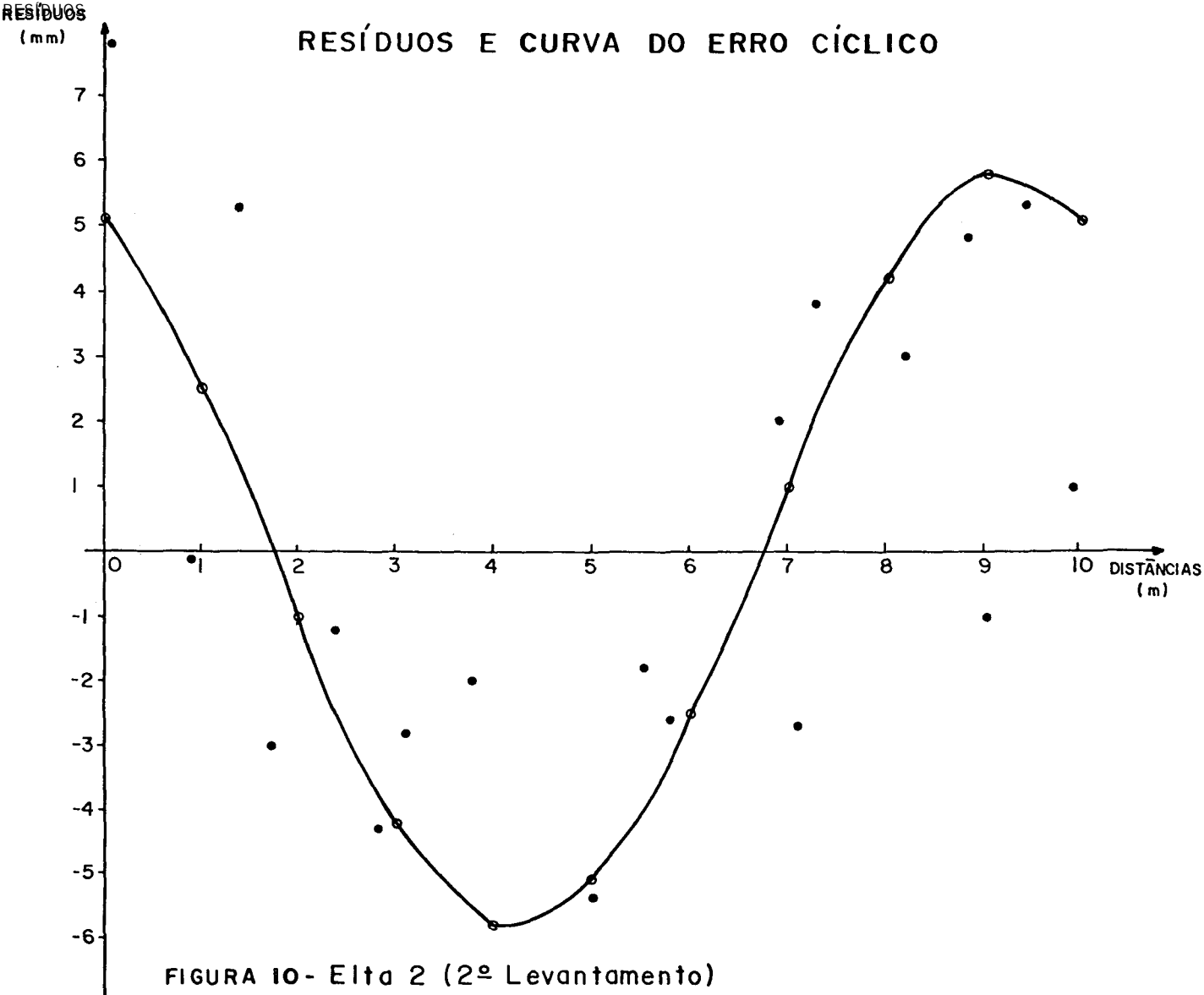
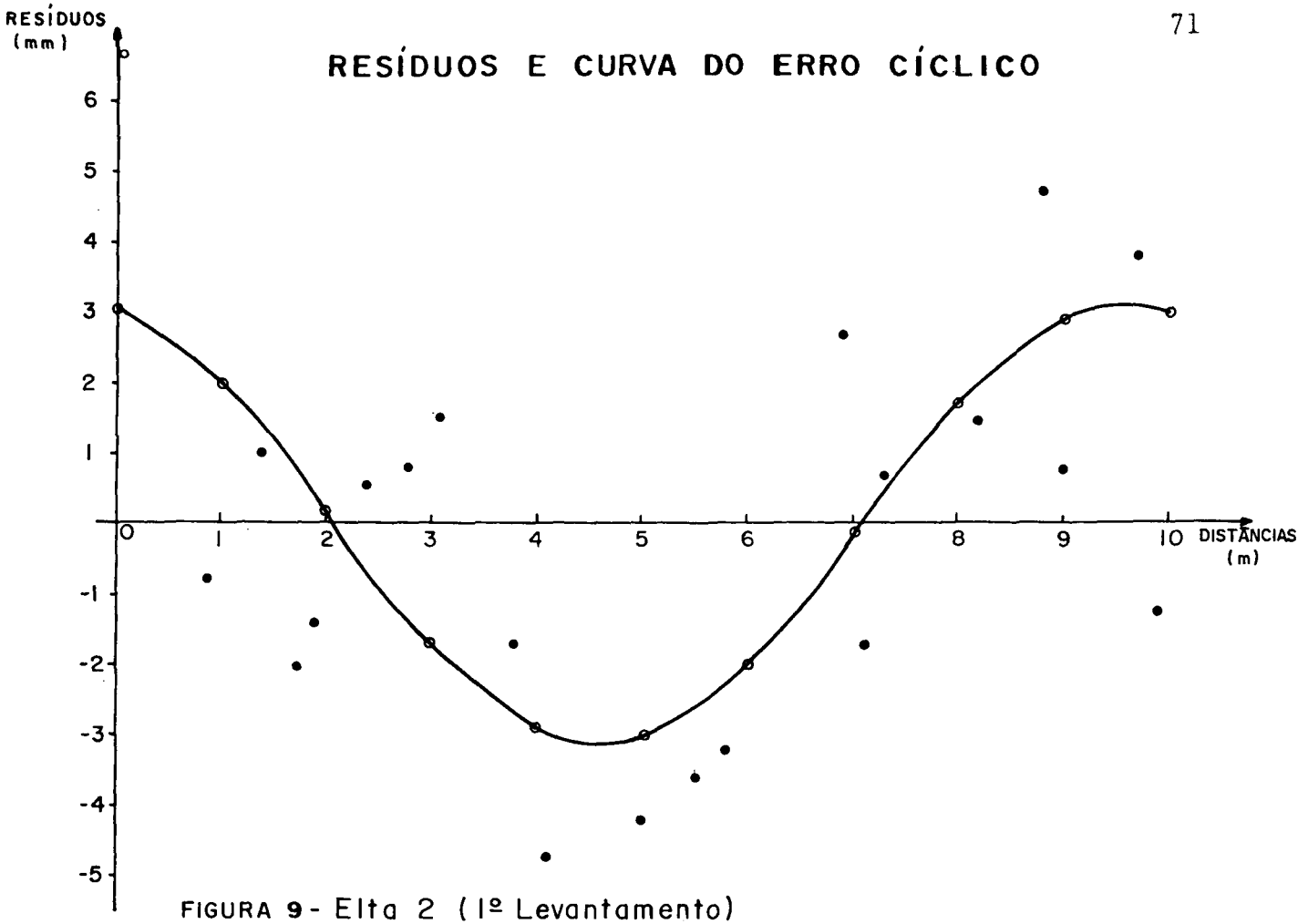
VI.3 RESULTADOS DOS AJUSTAMENTOS

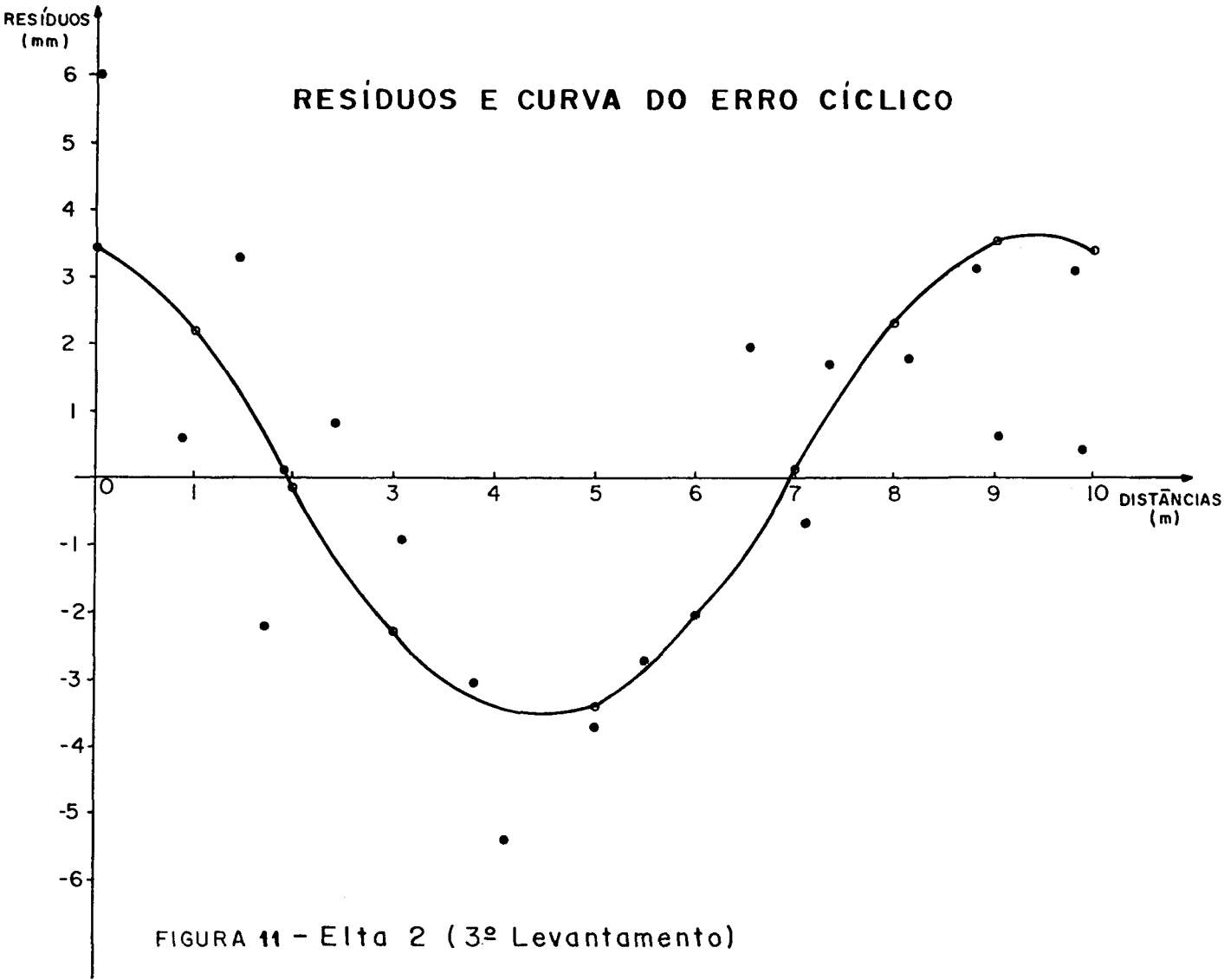
VI.3.1 ELTA 2 DA ZEISS

	1º LEVANTAMENTO		2º LEVANTAMENTO		3º LEVANTAMENTO	
	c/EQ. LINEAR	c/ FOURIER	c/EQ. LINEAR	c/ FOURIER	c/EQ. LINEAR	c/ FOURIER
z_0 (mm)	5,90	5,90	5,27	5,27	3,91	3,91
σ_{z_0} (mm)	1,55	1,55	2,37	2,37	1,47	1,47
σ_0^2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$\hat{\sigma}_0^2$	0,78	0,78	1,82	1,82	0,70	0,70
$\chi_{amost.}^2$	10,9	10,9	25,4	25,4	9,85	9,85
A (mm)	3,15	3,31	5,83	5,60	3,64	3,59
σ_A (mm)	0,0005	0,0005	0,001	0,001	0,0003	0,0003
B (m)	2,917	2,978	3,283	3,211	3,065	3,068
σ_B (mm)	0,29	0,27	0,30	0,50	0,10	0,20
σ_0^2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$\hat{\sigma}_0^2$	0,27	0,25	0,49	0,60	0,16	0,18
$\chi_{amost.}^2$	5,18	3,69	9,38	8,95	3,04	2,69

TABELA 11 - Quadro geral de resultados dos ajustamentos para o ELTA 2

Nas Figuras 9, 10 e 11, foram plotados os resíduos resultantes dos ajustamentos para a determinação do erro de zero. Nos mesmos gráficos foram plotadas as curvas dos erros cíclicos estimados.





VI.3.2 MA100 - TELUROMETER

	1º LEVANTAMENTO		2º LEVANTAMENTO		MÉDIA	
	c/EQ. LINEAR	c/ FOURIER	c/EQ. LINEAR	c/ FOURIER	c/EQ. LINEAR	c/ FOURIER
z_o (mm)	68,45	68,45	71,52	71,52	69,92	69,92
σ_{z_o} (mm)	1,50	1,50	1,2	1,2	1,1	1,1
σ_o^2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$\hat{\sigma}_o^2$	7,10	7,10	3,50	3,50	2,89	2,89
$\chi_{amost.}^2$	99,98	99,98	48,45	48,45	40,59	40,59
A (mm)	1,60	1,24	1,86	2,10	1,52	1,48
σ_A (mm)	0,002	0,002	0,001	0,001	0,001	0,0004
B (m)	0,042	9,943	9,859	8,121	9,873	8,046
σ_B (mm)	0,8	1,3	0,5	0,6	0,5	0,7
σ_o^2	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0	1,0
$\hat{\sigma}_o^2$	3,7	4,40	1,91	2,0	1,59	1,64
$\chi_{amost.}^2$	70,75	66,07	36,27	30,12	30,38	24,54

TABELA 12 - Quadro geral de resultados dos ajustamentos para o MA100

Nas Figuras 12 e 13, foram plotados os resíduos resultantes dos ajustamentos para a determinação do erro de zero. Nos mesmos gráficos foram plotadas as curvas dos erros cíclicos estimados.

RESÍDUOS
(mm)

RESÍDUOS E CURVA DO ERRO CÍCLICO

74

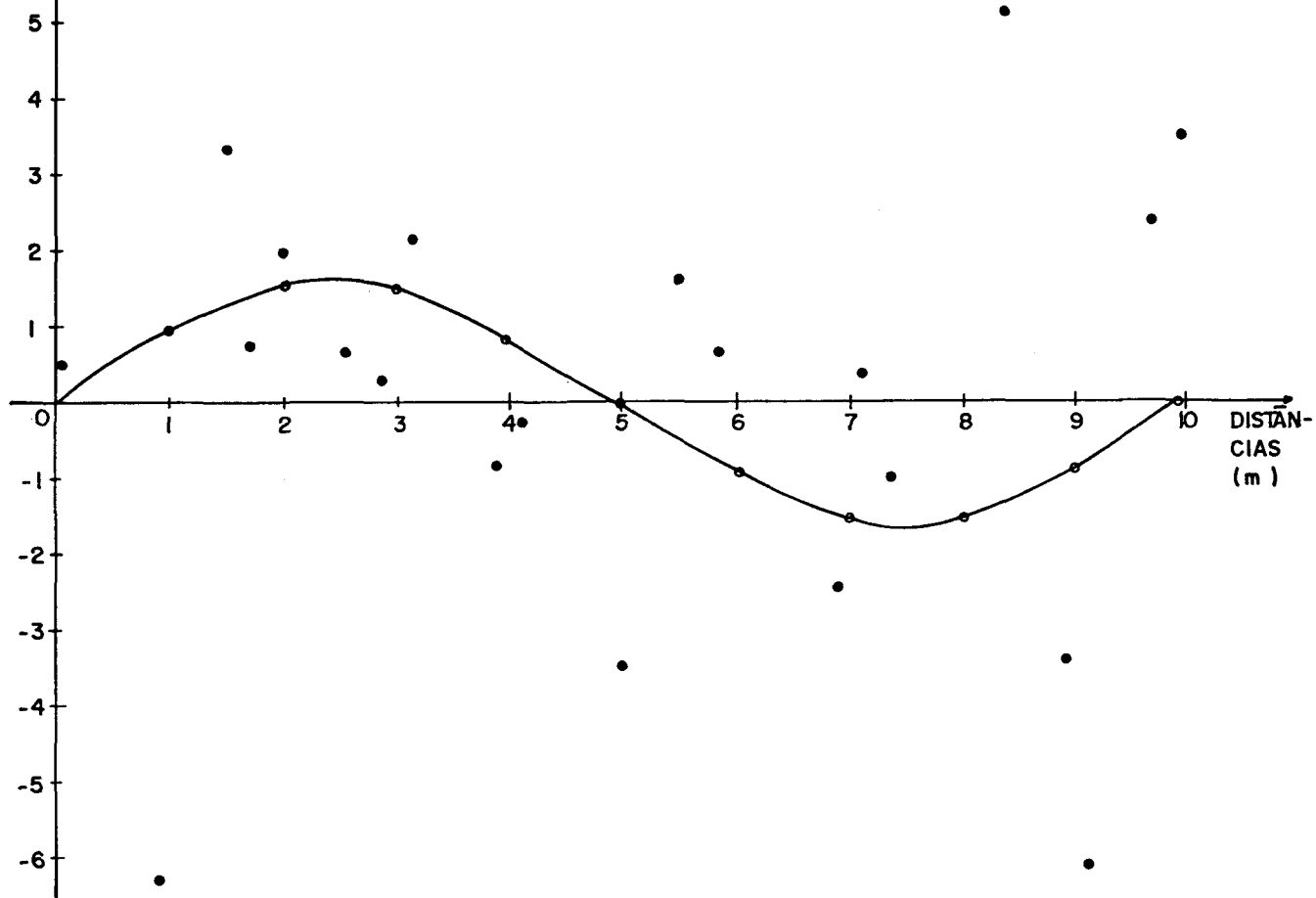


FIGURA- 12 - MA 100 (1º Levantamento)

RESÍDUOS
(mm)

RESÍDUOS E CURVA DO ERRO CÍCLICO

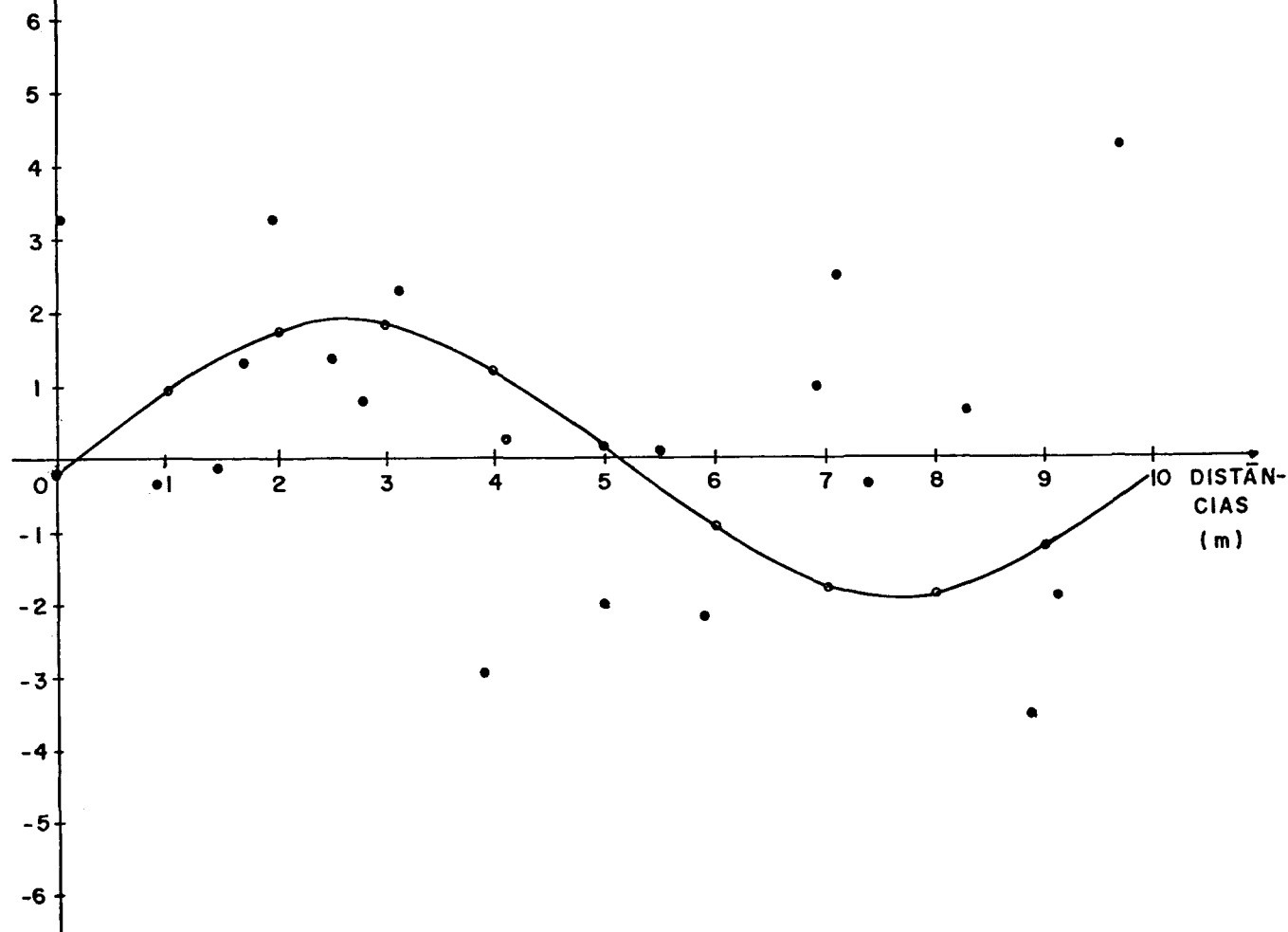


FIGURA - 13 - MA 100 (2º Levantamento)

VI.4 ANÁLISE DOS RESULTADOS

Para realizar o teste de hipótese, como elucidado no item IV.1, tem-se as seguintes regiões de aceitação da hipótese básica:

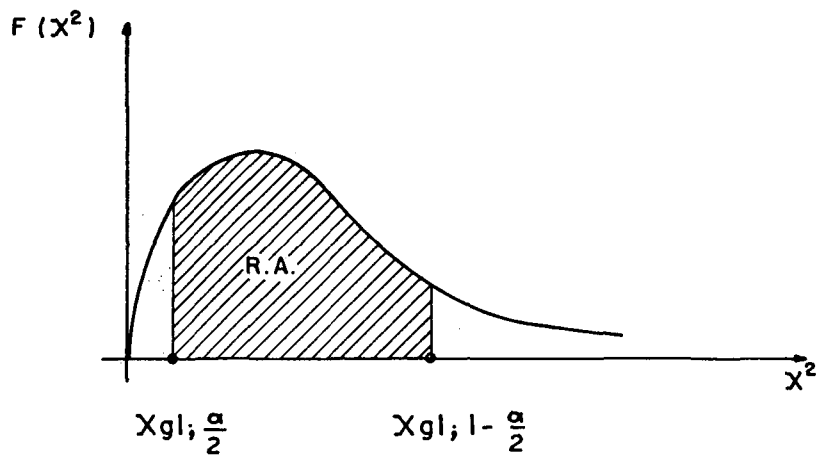


FIGURA-8 _ Função Qui-quadrada

1º AJUSTAMENTO:

NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA	$\chi^2_{14:\frac{\alpha}{2}}$	$\chi^2_{14:1-\frac{\alpha}{2}}$
$\alpha = 10\%$	6,57	23,69
$\alpha = 5\%$	5,63	26,12
$\alpha = 1\%$	4,08	31,32

Hipótese básica:

$$H_0: \sigma_o^2 = \hat{\sigma}_o^2$$

Hipótese alternativa:

$$H_1: \sigma_o^2 \neq \hat{\sigma}_o^2$$

2º AJUSTAMENTO:

NÍVEL DE SIGNIFICÂNCIA	$\chi^2_{19:\frac{\alpha}{2}}$	$\chi^2_{19:1-\frac{\alpha}{2}}$
$\alpha = 10\%$	10,12	30,14
$\alpha = 5\%$	8,91	32,85
$\alpha = 1\%$	6,84	38,58

ELTA 2

1º LEVANTAMENTO:

No primeiro ajustamento, aceita-se a hipótese básica(H_0) com o nível de significância de 10%, porém no segundo a hipótese H_0 é rejeitada para os níveis de significância considerados.

2º LEVANTAMENTO:

Nos dois ajustamentos aceita-se a hipótese básica (H_0) com nível de significância de 5%.

3º LEVANTAMENTO:

No primeiro ajustamento, aceita-se a hipótese básica(H_0) com nível de significância de 10%, porém no segundo a hipótese H_0 é rejeitada para os níveis de significância considerados.

Baseado nos resultados apresentados pelos ajustamentos, verifica-se que há presença de erro cíclico. Isto pode ser visto nas Figuras 9, 10 e 11, que ilustram a mesma tendência dos resíduos nos diferentes levantamentos.

Embora as evidências indiquem a presença de erro cíclico, este ainda é pequeno, ou seja, é menor que o fornecido considerando a precisão nominal do equipamento ou: $\pm(5\text{mm}+2\text{ppm})$.

Quanto ao erro de zero fornecido pelos ajustamentos, não se pode afirmar se ele é real ou não, pois o seu valor pode estar sendo resultado da influência da presença do erro cíclico, já que a linha base da UFPR é do tipo multipilares.

Na Tabela 13 encontram-se as diferenças entre as distâncias obtidas nos três levantamentos, que fornece uma idéia das discrepâncias dos resultados obtidos com o ELTA 2.

PONTOS	DIFERENÇAS		DIFERENÇAS		DIFERENÇAS	
	1º LEV.-2º LEV.		1º LEV.-3º LEV.		2º LEV.-3º LEV.	
1-2	5,3	mm	9,6	mm	4,3	mm
1-3	-4,4		0,7		5,1	
1-4	0,3		1,7		1,4	
1-5	2,9		3,4		0,5	
1-6	-0,2		1,0		1,2	
1-7	2,3		0,9		-1,4	
2-3	-2,6		-1,1		1,5	
2-4	-5,5		-4,9		0,6	
2-5	0,8		-2,0		-2,8	
2-6	-5,6		-6,2		-0,6	
2-7	-5,7		-7,1		-1,4	
3-4	-4,7		-3,2		1,5	
3-5	3,4		2,4		-1,0	
3-6	-2,5		-0,9		1,6	
3-7	-1,0		-1,4		-4,0	
4-5	0,7		4,5		3,8	
4-6	-1,0		1,4		2,4	
4-7	-2,6		-0,4		2,2	
5-6	1,6		2,8		1,2	
5-7	-1,7		-2,1		-0,4	
6-7	6,9		-1,1		-8,0	

TABELA 13 - Diferenças entre resultados dos levantamentos com o ELTA 2.

MA 100

1º LEVANTAMENTO:

Tanto no primeiro como no segundo ajustamento, não aceita-se a hipótese básica.

2º LEVANTAMENTO:

No primeiro ajustamento o Qui-quadrado amostral caiu fora da região de aceitação, porém no 2º ajustamento a hipótese básica é aceita com nível de significância de 10%.

Os resultados dos ajustamentos apresentam a presença de pequenos erros cíclicos. Pelas Figuras 12 e 13, verifica-se uma pequena tendência dos resíduos nos dois levantamentos. Em comparação com a precisão nominal $\pm (1,5 \text{ mm} + 2 \text{ ppm})$, o erro cíclico é muito pequeno e, portanto, desprezível.

Quanto ao erro de zero fornecido pelos ajustamentos, ele possui um valor considerável e a influência do erro cíclico é muito pequena em relação ao seu tamanho. Um melhor resultado para o erro de zero e que deve ser utilizado doravante, é o fornecido com a utilização da média das observações que é $z_0 = 69,92 \text{ mm}$ ou $z_0 = 70 \text{ mm}$, diferente, portanto, do recomendado pelo fabricante $z_0 = 93,2 \text{ mm}$.

Na Tabela 14 encontram-se as diferenças entre as distâncias obtidas nos dois levantamentos, que fornece uma idéia das discrepâncias dos resultados obtidos com o MA100.

PONTOS	DIFERENÇAS
	1º LEV. - 2º LEV.
1-2	-3,8 mm
1-3	4,6
1-4	6,5
1-5	4,7
1-6	6,9
1-7	-0,6
2-3	4,6
2-4	3,1
2-5	0,4
2-6	1,2
2-7	-0,7
3-4	1,5
3-5	-0,3
3-6	-5,3
3-7	-1,5
4-5	-1,1
4-6	1,7
4-7	1,5
5-6	6,5
5-7	4,9
6-7	9,4

TABELA 14 - Diferenças entre resultados dos levantamentos com o MA100

VI.5 DIFERENÇAS ENTRE RESULTADOS FORNECIDOS PELOS LEVANTAMENTOS COM OS DOIS DISTANCIÔMETROS

Afim de verificar as discrepâncias entre resultados fornecidos com os distanciômetros ELTA 2 e MA100, serão apresentadas as Tabelas 15 e 16, que contêm as distâncias médias dos levantamentos e correspondentes diferenças, sendo feito as seguintes considerações:

1º) Corrigindo apenas as distâncias obtidas com o MA100 do erro de zero $z_0 = 70$ mm. (Tabela 15)

2º) Fazendo as correções nas distâncias médias considerando todos os elementos de calibração obtidos nos ajustamentos. (Tabela 16)

Uma distância média corrigida poderá ser obtida considerando a equação:

$$D = L - z_0 + A \sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} (L + B) \right) \quad (5.1)$$

onde: D - distância corrigida;

L - distância não corrigida.

Os elementos de calibração médios são:

	z_0 (mm)	A (mm)	B (m)
ELTA 2	5,0	4,0	3,087
MA100	70,0	1,6	9,314

Baseando-se nas diferenças de resultados (Tabelas 15 e 16), verifica-se que, provavelmente o distanciômetro ELTA 2 possui um pequeno erro de zero, mas isto não pode ser afirmado com certeza, devido a influência da presença de erros cíclicos, como foi afirmado anteriormente.

PONTOS	DISTÂNCIAS MÉDIAS		DIFERENÇAS
	ELTA 2	MA100	
1-2	70,8675 m	70,8715 m	- 4,0 mm
1-3	222,7918	222,7857	6,1
1-4	385,8505	385,8430	7,4
1-5	648,2485	648,2422	6,2
1-6	759,6749	759,6730	2,8
1-7	789,9127	789,9081	4,6
2-3	151,9280	151,9155	12,5
2-4	314,9898	314,9768	12,9
2-5	577,3860	577,3777	8,3
2-6	688,8123	688,8063	6,0
2-7	719,0502	719,0490	1,1
3-4	163,0637	163,0538	9,9
3-5	425,4685	425,4580	10,4
3-6	536,8919	536,8854	6,4
3-7	567,1296	567,1254	4,2
4-5	262,4078	262,4018	6,0
4-6	373,8385	373,8306	7,9
4-7	404,0762	404,0708	5,3
5-6	111,4302	111,4242	6,0
5-7	141,6697	141,6668	2,8
6-7	30,2309	30,2435	-12,6

TABELA 15 - Diferenças entre resultados obtidos com os distanciômetros ELTA 2 e MA100, considerando apenas o erro de zero do MA100.

PONTOS	DISTÂNCIAS MÉDIAS		OBSERVAÇÕES
	ELTA 2	MA100	
1-2	70,8651 m	70,8717 m	-6,6 mm
1-3	222,7846	222,7873	-2,7
1-4	385,8429	385,8428	0,1
1-5	648,2466	648,2406	6,0
1-6	759,6740	759,6710	3,0
1-7	789,9117	789,9073	4,4
2-3	151,9230	151,9166	6,4
2-4	314,9809	314,9775	3,4
2-5	577,3822	577,3763	5,9
2-6	688,8112	688,8048	6,4
2-7	719,0493	719,0476	1,7
3-4	163,0559	163,0554	0,5
3-5	425,4602	425,4582	2,0
3-6	536,8868	536,8843	2,5
3-7	567,1252	567,1241	1,1
4-5	262,4015	262,4032	-1,7
4-6	373,8296	373,8321	-2,5
4-7	404,0671	404,0722	-5,1
5-6	111,4264	111,4249	1,5
5-7	141,6653	141,6677	-2,4
6-7	30,2296	30,2304	-0,8

TABELA 16 - Diferenças entre resultados obtidos com os distanciômetros ELTA 2 e MA100, considerando todos os elementos de calibração obtidos nos ajustamentos.

VII CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

VII.1 CONCLUSÕES

1- O erro total na MED pode ser expresso na forma: $\hat{\sigma}_0^2 = a^2 + b^2 D^2 + \sigma_{\Delta S}^2$, sendo que o valor de $\sigma_{\Delta S}$ não depende do distanciômetro, mas sim dos métodos de obtenção dos dados necessários à redução da distância à superfície desejada. O parâmetro b depende principalmente do conhecimento do índice de refração do ar e da estabilidade da frequência de modulação. O parâmetro a depende da precisão com que é realizada a medida de fase e a precisão do erro de zero e erro cíclico.

2- A calibração de campo é um procedimento simples e rápido de determinação dos erros sistemáticos envolvidos na medição eletrônica de distâncias.

3- A calibração de campo com linha base tipo multi-pilares, permite uma boa determinação do erro de zero e fator de escala, se as observações estiverem isentas de erro cíclico. Assim, uma linha base deste tipo, presta à determinação precisa do erro de zero e fator de escala se o erro cíclico tiver sido determinado a priori.

4- Embora não se obtenha boa precisão com a presença de erro cíclico, as observações com a linha base tipo multi-pila -

res permitem detectar a presença de todos os elementos de calibração.

5- A calibração de campo com a linha base constituída de pares de distâncias que diferem a metade do meio comprimento da onda de modulação, permite uma boa determinação de todos os elementos de calibração, já que a influência da presença de erros cíclicos é eliminada na determinação do erro de zero e fator de escala.

6- Pode-se calcular todos os elementos de calibração, simplesmente com o uso de calculadoras de bolso.

7- Os resultados apresentados com o uso de análise de Fourier ou com a equação linear do erro cíclico, são os mesmos.

VII.2 RECOMENDAÇÕES

1- Como os elementos de calibração dos MED podem sofrer variação com o uso e envelhecimento dos equipamentos, é importantíssimo a realização periódica da calibração.

2- Que se conclua as instalações já existentes na UFPR para a determinação rigorosa dos elementos do erro cíclico.

3- Que se realize melhores estudos da linha base constituída de pares de observações que diferem entre si a metade do meio comprimento da onda de modulação, pois parece apresentar grandes vantagens em comparação com a linha base tipo Multi-pilares.

APÊNDICE 1

PROCESSAMENTO DE DADOS

Foram preparados programas na linguagem FORTRAN para o Computador DEC10 da UFPR.

A forma de programação adotada, consistiu basicamente no preparo de programas principais, onde são realizadas operações tipo: leituras, impressões, decisões e chamadas de subrotinas.

Com a finalidade de testar metodologias e proposições teóricas, foram preparados quatro programas, sendo cada um com aplicações específicas, ou seja, considera-se a existência ou não de distâncias padrão, faz-se o cálculo da amplitude e fase do erro cíclico através da análise de Fourier ou pela forma linear da equação do erro cíclico.

PROGRAMA 1:

Considera a existência de distâncias padrão, e o cálculo dos elementos do erro cíclico é realizado através do ajustamento com a forma linear da equação do erro cíclico.

PROGRAMA 2:

Considera a existência de distâncias padrão, e o cálculo dos elementos do erro cíclico é realizado através da análise de Fourier.

PROGRAMA 3:

Não considera a existência de distâncias padrão, e o cálculo dos elementos do erro cíclico é realizado através do ajustamento com a forma linear da equação do erro cíclico.

PROGRAMA 4:

Não considera a existência de distâncias padrão, e o cálculo dos elementos do erro cíclico é realizado através da análise de Fourier.

Em anexo está uma cópia das listagens dos programas com o pacote de subrotinas e um exemplo de resultados apresentados.

C P R O G R A M A J
C T A B A L H O D E T E S E
C ELABORADO POR.....JOEL GRIPP JUNIOR - 1RO. SEMESTRE DE 1986
C
C

C FAZ-SE UM PRIMEIRO AJUSTAMENTO COM AS OBSERVACOES E
C TENDO COMO PARAMETROS O ERRO DE ZERO E O FATOR DE /
C ESCALA. NUM SEGUNDO AJUSTAMENTO FAZ-SE A DETERMINA-
C CAO DOS ELEMENTOS DO ERRO CICLICO POR UM AJUSTAMEN-
C TO COM A EQUACAO LINEAR DO ERRO.
C
C
C

C ARQUIVO DE ENTRADA:
C LINHA 1: INFORMACOES SOBRE O INSTRUMENTO(24 COLUNAS)
C LINHA 2: NUMERO DE OBSERVACOES(N)
C PRECISAO NOMINAL - PARTE CONSTANTE(MM)
C - PARTE PROPORCIONAL(PPM)
C LINHAS 3...I: OBSERVACOES
C LINHAS I+1: DISTANCIAS CONHECIDAS
C
C
C

C VARIAVEIS PRINCIPAIS:
C N.....NRO. DE OBSERVACOES
C FL,PPM...PARTE FIXA E VARIAVEL DA PRECISAO NOMINAL/INSTR.
C ALB()...DISTANCIAS OBSERVADAS
C ALC()...DISTANCIAS CONHECIDAS
C AMPL,FASE...ELEM. DEFINIDORES DA EQ. DO ERRO CICLICO
C C.....ERRO DE ZERO
C DEC....DESVIO PADRAO DO ERRO DE ZERO
C CK.....FATOR DE ESCALA
C DPCK...DESVIO PADRAO DO FATOR DE ESCALA
C DPA....DESVIO PADRAO DA AMPLITUDE
C DPR....DESVIO PADRAO DA FASE
C SIG....SIGMA ZERO A POSTERIORI DO PRIM. AJUSTAMENTO
C QUIQ...QUI-QUADRADO AMOSTRAL DO PRIM. AJUSTAMENTO
C SIG2...SIGMA ZERO A POSTERIORI DO SEG. AJUSTAMENTO
C QUIQ2...QUI-QUADRADO AMOSTRAL DO SEG. AJUSTAMENTO
C INFE()...INFORMACOES SOBRE O EQUIPAMENTO
C
C

IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION ALB(50),ALC(50),A(50,50),PESO(50),V(50),
1 AT(50,50),A1P(50,50),ATPA(50,50),ATPL(50),XA(50),
1 AX(50),Y1(50),YI(50),INFE(6),DPLB(50),PES2(50,50)
WRITE(5,77)
77 FORMAT(T2,'ENTRE C/ NOME ARQUIVO DE ENTRADA ',S)
READ(5,77)LEN
WRITE(5,78)
78 FORMAT(T2,'ENTRE C/ NOME ARQUIVO DE SAIDA ',S)
READ(5,77)ISA
7 FORMAT(T1,A4)
OPEN(UNIT=22,FILE=LEN,ACCESS='SEQUIN')
OPEN(UNIT=23,FILE=ISA,ACCESS='SEQUIN')
READ(22,6)(INFE(I),I=1,6)
6 FORMAT(T2,6(A4))
WRITE(23,1)LEN
1 FORMAT(///,T2,'RESULTADO EX. DE NCEMMO C/ O ARQUIVO ',

READ(22,*)N,FI,PPM

READ(22,*)(ALB(1),I=1,N)

READ(22,*)(ALC(1),I=1,N)

C

C PRIMEIRO AJUSTAMENTO- DET. DO ERRO DE ZERO E FATOR DE ESCALA

C

C

CALL MATA1(A,ALC,N)

C

CALLULO DOS DESVIOS PADRAO DAS OBSERVACOES CONSI-

C

DERANDO APENAS IDA E VOLTAS(2 OBSERVACOES)

FI1=FI/1000.D0

VAA=PPM/1000000.D0

DO 888 I=1,N

DPLR(I)=(FI1+VAA*ALB(I))/DSORT(2,D0)

888

CONTINUE

CALL PESO2(N,DPLR,PESO)

CALL TRANSP(A,N,2,AT)

CALL MUNDIA(AT,PESO,2,N,ATP)

CALL PROD1(ATP,A,2,N,2,ATPA)

CALL PROD2(ATP,ALB,2,N,ATPL)

CALL INVER2(ATPA)

CALL PROD2(ATPA,ATPL,2,2,XA)

CALL PROD2(A,XA,N,2,AX)

C=XA(1)+1000.D0

CK=XA(2)

DO 10 I=1,N

V(I)=AX(I)-ALB(I)

10

CONTINUE

CALL PRECCK(V,PESO,N,SIG,DPC,DPCCK,OUTQ,ATPA)

C

C SEGUNDO AJUSTAMENTO- DET DA AMPL. E FASE DA EQ. DO ERRO CICL.

C

CALL PESV(A,AT,SIG,ATPA,N,DPLR,PES2,2)

CALL MATA2(A,N,ALC)

CALL TRANSP(A,N,2,AT)

CALL PROD1(AT,PES2,2,N,N,ATP)

CALL PROD1(ATP,A,2,N,2,ATPA)

CALL INVER2(ATPA)

CALL PROD2(ATP,V,2,N,ATPL)

CALL PROD2(ATPA,ATPL,2,2,XA)

CALL PROD2(A,XA,N,2,AX)

X=XA(1)

Y=XA(2)

DO 11 I=1,N

V1(I)=AX(I)-V(I)

V(I)=V(I)+1000.D0

11

CONTINUE

CALL PRECAR(V1,N,SIG2,X,Y,AMPL,FASE,DPA,DPR,OUTQ2,ATPA,PES2)

C

C IMPRESSAO DE DADOS DE ENTRADA E RESULTADOS:

C

WRITE(23,80)

80

FORMAT(/,110,'P R O G R A M A 1',/)

WRITE(23,100)(INFE(I),I=1,6)

100

FORMAT(T2,80(' '),//,T10,'CALIBRACAO DE DISTANCIOMETROS ',

1 'ELETRONICOS',//,T5,'INSTRUMENTO.....',6(A4),//,

1 T2,80(' '))

WRITE(23,110)

110

FORMAT(/,T5,'LINHA',T20,'DISI.MEDIDAS',T40,

1 'DIST.PADRAO')

DO 120 I=1,N

WRITE(23,115)1,ALB(I),ALC(I)

```

115  FORMAT(15,I3,I20,F10.5,I40,F10.5)
120  CONTINUE
    WRITE(23,122)
122  FORMAT(//,T2,80(' '),//,T10,'RESIDUOS PRIM. AJUST.(MM)',
1    //)
    DO 126 I=1,N
    WRITE(23,125)I,V(I)
125  FORMAT(I8,'LINHA',I2,T18,F8.3)
126  CONTINUE
    WRITE(23,130)C,DPC,CK,DPCR,AMPL,DPA,FASE,DPB
130  FORMAT(///,80(' '),//,T10,'EPDO DE ZERO(MM)....=',F7.2,
1    ' +/- ',F,/,T10,'FATOR DE ESCALA ....=',F8.6,
1    ' +/- ',F,/,T10,'AMPLITUDE(MM).....=',F7.4,' +/- ',
1    F,/,T10,'FASE(U).....=',F5.3,' +/- ',F,///,
1    T2,80(' '))
    WRITE(23,140)SIG,QUIQ
140  FORMAT(//,T5,'PRIMEIRO AJUSTAMENTO...',//,T7,
1    'SIGMA ZERO A PRIORIE=',//,T7,
1    'SIGMA ZERO A POSTERIORI=',F,/,T7,'QUI-QUADRADO ',
1    'AMOSTRAL=',F)
    WRITE(23,150)SIG2,QUIQ2
150  FORMAT(//,T5,'SEGUNDO AJUSTAMENTO...',//,T7,
1    'SIGMA ZERO A PRIORIE=',//,T7,
1    'SIGMA ZERO A POSTERIORI=',F,/,T7,
1    'QUI-QUADRADO AMOSTRAL=',F,////,80('*'))
990  CALL DEFEAS(24)
    CALL DEFEAS(23)
    END

```



```

C      NCEFOU      NCEFOU      NCEFOU      NCEFOU      NCEFOU      90
C      P R O G R A M A      2
C      T R A B A L H O      D E      T E S T E
C      ELABORADO POR,...JOEL GRIPP JUNIOR - 1RO. SEMESTRE DE 1986
C      .....
C      FAZ-SE UM PRIMEIRO AJUSTAMENTO COM AS OBSERVACOES E
C      TENDO COMO PARAMETROS O ERRO DE ZERO E O FATOR DE /
C      ESCALA. NUM SEGUNDO AJUSTAMENTO FAZ-SE A DETERMINA-
C      CAO DOS ELEMENTOS DO ERRO CICLICO POR UMA ANALISE DE FOURIER
C      .....
C      ARQUIVO DE ENTRADA:
C      LINHA 1: INFORMACOES SOBRE O INSTRUMENTO(24 COLUNAS)
C      LINHA 2: NUMERO DE OBSERVACOES(N)
C      PRECISAO NOMINAL - PARTE CONSTANTE(MM)
C      - PARTE PROPORCIONAL(PPM)
C      LINHAS 3...I: OBSERVACOES
C      LINHAS I+1 ...: DISTANCIAS CONHECIDAS
C      .....
C      VARIAVEIS PRINCIPAIS:
C      N.....NRO. DE OBSERVACOES
C      FI,PPM.,PARTE FIXA E VARIAVEL DA PRECISAO NOMINAL/INSTR.
C      ALB(),...DISTANCIAS OBSERVADAS
C      ALC(),...DISTANCIAS CONHECIDAS
C      AMPL,FASE,..ELEM. DEFINIDORES DA EQ. DO ERRO CICLICO
C      C.....ERRO DE ZERO
C      DPC,...DESVIO PADRAO DO ERRO DE ZERO
C      CK.....FATOR DE ESCALA
C      DPCK,...DESVIO PADRAO DO FATOR DE ESCALA
C      DPA,...DESVIO PADRAO DA AMPLITUDE
C      DPB,...DESVIO PADRAO DA FASE
C      SIG,...SIGMA ZERO A POSTERIORI DO PRIM. AJUSTAMENTO
C      QUIQ,...QUI=QUADRADO AMOSTRAL DO PRIM. AJUSTAMENTO
C      SIG2,...SIGMA ZERO A POSTERIORI DO SEG. AJUSTAMENTO
C      QUIQ2,...QUI=QUADRADO AMOSTRAL DO SEG. AJUSTAMENTO
C      INFE(),...INFORMACOES SOBRE O EQUIPAMENTO
C
C      IMPLICIT REAL*8(A-H,D-Z)
C      DIMENSION ALB(50),ALC(50),A(50,50),PESO(50),V(50),
1      AT(50,50),ATP(50,50),ATPA(50,50),ATPL(50),XA(50),
1      AX(50),V1(50),VT(50),INFE(6),DPLB(50)
C      WRITE(5,77)
77      FORMAT(T2,'ENTRE C/ NOME ARQUIVO DE ENTRADA ',S)
C      READ(5,7)IEN
C      WRITE(5,78)
78      FORMAT(T2,'ENTRE C/ NOME ARQUIVO DE SAIDA ',S)
C      READ(5,7)ISA
C      FORMAT(T1,A4)
C      OPEN(UNIT=22,FILE=IEN,ACCESS='SEQIN')
C      OPEN(UNIT=23,FILE=ISA,ACCESS='SEQOUT')
C      READ(22,6)(INFE(I),I=1,6)
6      FORMAT(T2,6(A4))

```



```

WRITE(23,100)(INFE(I),I=1,6)
100 FORMAT(T2,80(' '),/,T10,'CALIBRACAO DE DISTANCIOMETROS ',
1 'ELETRONICOS',/,T5,INSTRUMENTO.....',6(A4),/,
1 T2,80(' '))
WRITE(23,1)IEN
1 FORMAT(/,T2,'RESULTADO EX. DE CEFUO C/ O ARQUIVO ',
1 A4,' .....JOEL GRIPP JUNIOR')
READ(22,*)N,FI,PPM
READ(22,*)(ALB(I),I=1,N)
READ(22,*)(ALC(I),I=1,N)

C
C PRIMEIRO AJUSTAMENTO- DET. DO ERRO DE ZERO E FATOR DE ESCALA
C
C
C CALL MATAAC(A,ALC,N)
C CALCULO DOS DESVIOS PADRAO DAS OBSERVACOES CONSIDE-
C RANDO APENAS IDA E VOLTA(2 OBSERVACOES)
FII=FI/1000.D0
VAA=PPM/1000000.D0
DO 888 I=1,N
DPLB(I)=(FII+VAA*ALB(I))/DSQRT(2.D0)
888 CONTINUE
CALL PESO2(N,DPLB,PESO)
CALL TRANSP(A,N,2,AT)
CALL MUMDIA(AT,PESO,2,N,ATP)
CALL PROD1(ATP,A,2,N,2,ATPA)
CALL PROD2(ATP,ALB,2,N,ATPL)
CALL INVER2(ATPA)
CALL PROD2(ATPA,ATPL,2,2,XA)
CALL PROD2(A,XA,N,2,AX)
C=XA(1)*1000.D0
CK=XA(2)
DO 10 I=1,N
V(I)=AX(I)-ALB(I)
10 CONTINUE
CALL PRECCK(V,PESO,N,SIG,DPC,DPCCK,QUIQ,ATPA)

C
C SEGUNDO AJUSTAMENTO- DET DA AMPL. E FASE DA EQ. DO ERRO CICL.
C
CALL PESV(A,AT,SIG,ATPA,N,DPLB,PES2,2)
CALL MATAFU(A,N,ALC)
CALL TRANSP(A,N,6,AT)
CALL PROD1(AT,PES2,6,N,N,ATP)
CALL PROD1(ATP,A,6,N,6,ATPA)
CALL VERSOL(ATPA,VT,6)
CALL PROD2(ATP,V,6,N,ATPL)
CALL PROD2(ATPA,ATPL,6,6,XA)
CALL PROD2(A,XA,N,6,AX)
DO 11 I=1,N
V1(I)=AX(I)-V(I)
V(I)=V(I)*1000.D0
11 CONTINUE
CALL CAMFAP(XA,V1,N,AMPL,FASE,SIG2,DPA,DPB,QUIQ2,ATPA,PES2)

C
C IMPRESSAO DE DADOS DE ENTRADA E RESULTADOS:
C
WRITE(23,110)
110 FORMAT(/,T5,'LINHA',T20,'DIST.MEDIDAS',T40,
1 'DIST.PADRAO')
DO 120 I=1,N

```



```

WRITE(23,115)I,ALB(I),ALC(I)
115  FORMAT(T5,I3,T20,F10.5,T40,F10.5)
120  CONTINUE
WRITE(23,122)
122  FORMAT(//,T2,80(' '),//,T10,'RESIDUOS PRIM. AJUST.(MM)',
1    //)
DO 126 I=1,N
WRITE(23,125)I,V(I)
125  FORMAT(T8,'LINHA',I2,T18,F8.3)
126  CONTINUE
WRITE(23,130)C,DPC,CK,DPCK,AMPL,DPA,FASE,DPB
130  FORMAT(///,80(' '),T10,'ERRO DE ZERO(MM)....',F7.2,
1    ' +/- ',F,/,T10,'FATOR DE ESCALA ....',F8.6,
1    ' +/- ',F,/,T10,'AMPLITUDE(MM).....',F7.2,' +/- ',
1    F,/,T10,'FASE(M).....',F5.3,' +/- ',F,///,
1    T2,80(' '))
WRITE(23,140)SIG,QUIQ
140  FORMAT(//,T5,'PRIMEIRO AJUSTAMENTO...',//,T7,
1    'SIGMA ZERO A PRIORI=1.',//,T7,
1    'SIGMA ZERO A POSTERIORI=',F,//,T7,'QUI-QUADRADO ',
1    'AMOSTRAL=',F)
WRITE(23,150)SIG2,QUIQ2
150  FORMAT(//,T5,'SEGUNDO AJUSTAMENTO...',//,T7,
1    'SIGMA ZERO A PRIORI= ',//,T7,
1    'SIGMA ZERO A POSTERIORI= ',F,//,T7,
1    'QUI-QUADRADO AMOSTRAL= ',F,///,80('*'))
999  CALL RELEAS(22)
CALL RELEAS(23)
END

```


P R O G R A M A 3

DETERMINACAO DO ERRO DE ZERO E ELEMENTOS DO ERRO
CICLICO DE DISTANCIOMETROS ELETRONICOS

FAZ-SE UM PRIMEIRO AJUSTAMENTO COM AS OBSERVACOES
TENDO COMO PARAMETROS AS DISTANCIAS INTER-PILARES
E O ERRO DE ZERO. NUM SEGUNDO AJUSTAMENTO FAZ-SE A
DETERMINACAO DOS ELEMENTOS DO ERRO CICLICO(AMPLI-
TUDE E FASE) POR UM AJUSTAMENTO COM A EQUACAO
LINEAR DESTA ERRO.

ELABORADO POR.....JOEL GRIPP JUNIOR...NOV. DE 1985
T R A B A L H O D E T E S E

OS DADOS DE ENTRADA SERAO:.....
CARTAO 1...INFORMACOES SOBRE O INSTRUMENTO(24 COL.)
CARTAO 2...NUMERO DE OBSERVACOES(N)
NUMERO DE INTERSECOES(M)
CARTAO 3...PRECISAO NOMINAL DO APARELHO:
PARTE FIXA(FI)...EM MILIMETROS
PARTE VARIAVEL(VA)...EM PPM
CARTAO 4...I...OBSERVACOES

VARIAVEIS PRINCIPAIS:

N.....NRO. DE OBSERVACOES
FI,PPM...PARTE FIXA E VARIAVEL DA PRECISAO NOMINAL/INSTR.
ALB()...DISTANCIAS OBSERVADAS
AMPL,FASE...ELEM. DEFINIDORES DA EQ. DO ERRO CICLICO
C.....ERRO DE ZERO
DPC....DESVIO PADRAO DO ERRO DE ZERO
DPA....DESVIO PADRAO DA AMPLITUDE
DPR....DESVIO PADRAO DA FASE
SIG....SIGMA ZERO A POSTERIORI DO PRIM. AJUSTAMENTO
QUIQ...QUI-QUADRADO AMOSTRAL DO PRIM. AJUSTAMENTO
SIG2...SIGMA ZERO A POSTERIORI DO SEG. AJUSTAMENTO
QUIQ2...QUI-QUADRADO AMOSTRAL DO SEG. AJUSTAMENTO

IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)

DIMENSION ALB(50),A(50,50),PES0(50),V(50),
1 AT(50,50),ATD(50,50),ATPA(50,50),ATPL(50),XA(50),
1 AX(50),V1(50),VT(50),INFF(6),DPLB(50),PES2(50,50)
WRITE(5,77)

77 FORMAT(T2,'ENTRE C/ NOME ARQUIVO DE ENTRADA ',S)
READ(5,7)IEN
WRITE(5,76)

76 FORMAT(T2,'ENTRE C/ NOME ARQUIVO DE SAIDA ',S)
READ(5,7)ISA

7 FORMAT(T1,A4)
OPEN(UNIT=22,FILE=IEN,ACCESS='SEQUIN')

OPEN(UNIT=23,FILE=ISA,ACCESS='SEQUENT')

94

READ(22,5)(INFE(I),I=1,6)

6 FORMAT(12,6(A4))

WRITE(23,1)IFE

1 FORMAT(///,12,'RESULTADO EX. DE NSENMO C/ O ARQUIVO ',

1 A4,'JOEL GRIPP JUNIOR',/,T10,'CONSIDERA PRECISAO '

1 , 'NOMINAL PARA MEDIA DE OBSERVACOES')

READ(22,*)N,M

READ(22,*)F1,PDE

READ(22,*)(ALB(I),I=1,N)

M=M+1

C
C PRIMEIRO AJUSTAMENTO- DET. DO ERRO DE ZERO E FATOR DE ESCALA

C
C
C CALCULO DOS DESVIOS PADRAO DAS OBSERVACOES CONSIDERAN-
C APENAS 1DA E VOLTA(DUAS OBSERVACOES)

FEI=FI/1000.D0

VAA=PPM/1000000.D0

DO 588 I=1,N

DPLE(1)=(FEI+VAA*ALB(I))/DSQR(2.D0)

888 CONTINUE

CALL MATA(N,M,A)

CALL PESO2(N,DPLE,PESO)

CALL TRANSP(A,N,M,AT)

CALL MUNDIA(A1,PESO,M,N,ATP)

CALL PROD1(ATP,A,M,N,M,ATPA)

CALL PROD2(ATP,ALB,M,N,ATPL)

CALL VERSOL(ATPA,VT,M)

CALL PROD2(ATPA,ATPL,M,M,XA)

CALL PROD2(A,XA,N,M,AX)

C=XA(M)*1000.D0

DO 10 I=1,N

V(I)=AX(I)-ALB(I)

10 CONTINUE

CALL PRECSF(V,PESO,N,M,SIG,DPC,QUIQ,ATPA)

C
C SEGUNDO AJUSTAMENTO- DET DA AMPL. E FASE DA EQ. DO ERRO CICL.

CALL PESV(A,A1,SIG,ATPA,M,DPLE,PES2,M)

CALL MATA2(A,N,AX)

CALL TRANSP(A,N,2,AT)

CALL PROD1(AT,PES2,2,N,N,ATP)

CALL PROD1(ATP,A,2,N,2,ATPA)

CALL INVER2(ATPA)

CALL PROD2(ATP,V,2,N,ATPL)

CALL PROD2(ATPA,ATPL,2,2,AA)

CALL PROD2(A,XA,N,2,AX)

X=XA(1)

Y=XA(2)

DO 11 I=1,N

V1(I)=AX(I)-V(I)

V(I)=V(I)*1000.D0

11 CONTINUE

CALL PRECAR(V1,N,STG2,X,Y,AMPL,FASE,DPA,DPB,OUTQ2,ATPA,PES2)

C
C IMPRESSAO DE DADOS DE ENTRADA E RESULTADOS:

WRITE(23,89)

89 FORMAT(/,T10,'P R O G R A M A 31,/')

WRITE(23,100)(TRFE(I),I=1,6)

```

100  FORMAT(T2,80('*'),//,T10,'CALIBRACAO DE DISTANCIOMETROS ',
      1  'ELETRONICOS',//,T5,'INSTRUMENTO.....',6(A4),//,
      1  T2,80(' '))
      WRITE(23,110)
110  FORMAT(/,T5,'LINHA',T20,'DIST.MEDIDAS')
      DO 124 I=1,N
      WRITE(23,115)I,ALB(I)
115  FORMAT(T5,I3,T20,F10.5)
120  CONTINUE
      WRITE(23,122)
122  FORMAT(/,T2,80(' '),//,T10,'RESIDUOS PRIM. AJUST.(MM)',
      1  '/')
      DO 126 I=1,N
      WRITE(23,125)I,V(I)
125  FORMAT(T8,'LINHA',I3,T16,F)
126  CONTINUE
      WRITE(23,130)C,DPC,AMPL,DPA,FASE,DPB
130  FORMAT(///,80('-'),//,T10,'ERRO DE ZERO(MM).....',F7.2,
      1  ' +/- ',F,/,
      1  //,T10,'AMPLITUDE(MM).....',F7.2,' +/- ',
      1  F,/,T10,'FASE(V).....',F5.3,' +/- ',F,///,
      1  T2,80(' '))
      WRITE(23,140)SIG,OUT0
140  FORMAT(//,T5,'PRIMEIRO AJUSTAMENTO...',//,T7,
      1  'SIGMA ZERO A PRIORI=1.',//,T7,
      1  'SIGMA ZERO A POSTERIORI=',F,//,T7,'QUI-QUADRADO ',
      1  'AMOSTRAL=',F)
      WRITE(23,150)SIG2,OUT02
150  FORMAT(//,T5,'SEGUNDO AJUSTAMENTO...',//,T7,
      1  'SIGMA ZERO A PRIORI= 1.          ',//,T7,
      1  'SIGMA ZERO A POSTERIORI= ',F,//,T7,
      1  'QUI-QUADRADO AMOSTRAL= ',F,////,80('*'))
999  CALL RELEAS(22)
      CALL RELEAS(23)
      END

```


C P R O G R A M A 4

C T R A B A L H O D E T E S E

C ELABORADO POR....JOEL GRIPP JUNIOR - IRG, SEMESTRE DE 1986

C DETERMINACAO DO ERRO DE ZERO E ELEMENTOS DO ERRO
C CICLICO DE DISTANCIOMETROS ELETRONICOS

C
C

C FAZ-SE UM PRIMEIRO AJUSTAMENTO COM AS OBSERVACOES
C TENDO COMO PARAMETROS AS DISTANCIAS INTER-PILARES
C E O ERRO DE ZERO. NUM SEGUNDO AJUSTAMENTO FAZ-SE A
C DETERMINACAO DOS ELEMENTOS DO ERRO CICLICO(AMPLI-
C TUDE E FASE) E/ ANALISE DE FOURIER.

C
C

C OS DADOS DE ENTRADA SERAO:.....

C CARTAO 1...INFORMACOES SOBRE O INSTRUMENTO(24 COL.)

C CARTAO 2...NUMERO DE OBSERVACOES(N)

C NUMERO DE INTERSECOES(M)

C CARTAO 3...PRECISAO NOMINAL DO APARELHO:

C PARTE FIXA(FI)..EM MILIMETROS

C PARTE VARIÁVEL(VA)..EM PPM

C CARTAO 4..I...OBSERVACOES

C
C

C VARIÁVEIS PRINCIPAIS:

C N.....NRO. DE OBSERVACOES

C FI,PPM..PARTE FIXA E VARIÁVEL DA PRECISAO NOMINAL/INSTR.

C ALB()...DISTANCIAS OBSERVADAS

C AMPL,FASE..ELEM. DEFINIDORES DA EQ. DO ERRO CICLICO

C C.....ERRO DE ZERO

C DPC....DESVIO PADRAO DO ERRO DE ZERO

C DPA....DESVIO PADRAO DA AMPLITUDE

C DPR....DESVIO PADRAO DA FASE

C SIG....SIGMA ZERO A POSTERIORI DO PRIM. AJUSTAMENTO

C QUIQ....QUI-QUADRADO AMOSTRAL DO PRIM. AJUSTAMENTO

C SIG2....SIGMA ZERO A POSTERIORI DO SEG. AJUSTAMENTO

C QUIQ2....QUI-QUADRADO AMOSTRAL DO SEG. AJUSTAMENTO

C INFE()...INFORMACOES SOBRE O EQUIPAMENTO

C
C IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)

DIMENSION ALB(50),A(50,50),PES0(50),V(50),

1 AT(50,50),ATP(50,50),ATPA(50,50),ATPL(50),XA(50),

1 AX(50),V1(50),V1(50),INFE(6),PES2(50,50),DPLR(50)

WRITE(5,77)

77 FORMAT(12,'ENTRE C/ NOME ARQUIVO DE ENTRADA ',S)

READ(5,7)IEN

WRITE(5,78)

78 FORMAT(12,'ENTRE C/ NOME ARQUIVO DE SAIDA ',S)

READ(5,7)ISA

7 FORMAT(T1,A4)

OPEN(UNIT=22,FILE=IEN,ACCESS='SEQIN')

OPEN(UNIT=23,FILE=ISA,ACCESS='SEQOUT')

READ(22,6)(INFE(I),I=1,6)

6 FORMAT(12,6(A4))


```

      WRITE(23,80)
80  FORMAT(/,T10,'P R O G R A M A 4',/)
      WRITE(23,100)(TIME(I),I=1,6)
100  FORMAT(T2,80(' '),//,T10,'CALIBRACAO DE DISTANCIOMETROS ',
1    'ELETRONICOS',//,T5,'INSTRUMENTO.....',6(A4),//,
1    T2,80(' '))
      WRITE(23,1)1EN
1    FORMAT(///,T2,'RESULTADO EX. DE NSEFOU C/ O ARQUIVO ',
1    A4,' .....JOEL GRIPP JUNIOR')
      READ(22,*)N,M
      READ(22,*)F1,PPM
      READ(22,*)(ALB(I),I=1,N)
C      CALCULO DOS DESVIOS PADRAO DAS OBSERVACOES CONSIDE-
C      RANDO APENA IDA E VOLTA(2 OBSERVACOES)
      F11=F1/1000.D0
      VAA=PPM/1000000.D0
      DO 888 I=1,N
      DPLB(I)=(F11+VAA*ALB(I))/DSQR(2.D0)
888  CONTINUE
      M=M+1
C
C  PRIMEIRO AJUSTAMENTO- DET. DO ERRO DE ZERO E FATOR DE ESCALA
C
C      CALL MATA(N,M,A)
      CALL PESO2(N,DPLB,PESO)
      CALL TRANSP(A,N,M,AT)
      CALL MUNDIA(AT,PESO,M,N,ATP)
      CALL PROD1(ATP,A,N,N,M,ATPA)
      CALL PROD2(ATP,ALB,N,N,ATPL)
      CALL VERSOL(ATPA,VT,M)
      CALL PROD2(ATPA,ATPL,M,M,AA)
      CALL PROD2(A,AA,N,M,AX)
      C=AX(M)*1000.D0
      DO 10 I=1,N
      V(I)=AX(I)-ALB(I)
10  CONTINUE
      CALL PRECSE(V,PESO,N,E,SIG,DPC,QUI0,ATPA)
C
C  SEGUNDO AJUSTAMENTO- DET DA AMPL. E FASE DA EQ. DO ERRO CICL.
C
      CALL PESVIA(AT,SIG,ATPA,N,DPLB,PES2,M)
      CALL MATAFII(A,N,AX)
      CALL TRANSP(A,N,6,AT)
      CALL PROD1(AT,PES2,6,N,N,ATP)
      CALL PROD1(ATP,A,6,N,6,ATPA)
      CALL VERSOL(ATPA,VT,6)
      CALL PROD2(ATP,V,6,N,ATPL)
      CALL PROD2(ATPA,ATPL,6,6,AA)
      CALL PROD2(A,AA,N,6,AX)
      DO 11 I=1,N
      V1(I)=AX(I)-V(I)
      V(I)=V(I)*1000.D0
11  CONTINUE
      CALL CAMFAP(XA,V1,M,AMPL,FASE,SIG2,DPA,DPB,QUI02,ATPA,PES2)
C
C  IMPRESSAO DE DADOS DE ENTRADA E RESULTADOS:
C
      WRITE(23,110)
110  FORMAT(//,T5,'LINHA',T20,'DIST.MEDIDAS')
      DO 120 I=1,N
      WRITE(23,115)1,ALB(I)
115  FORMAT(T5,T3,T20,F10.5)

```



```

120 CONTINUE
WRITE(23,122)
122 FORMAT(//,T2,80(' '),//,T10,'RESIDUOS PRIM. AJUST.(MM)',
1 //)
DO 126 I=1,N
WRITE(23,125)I,V(I)
125 FORMAT(T8,'LINHA',I2,118,F8.3)
126 CONTINUE
WRITE(23,130)C,DPC,AMPL,DPA,FASE,DPB
130 FORMAT(///,80(' '),//,T10,'ERRO DE ZERO(MM)....',F7.2,
1 ' +/- ',F,/,
1 //,T10,'AMPLITUDE(MM).....',F7.2,' +/- ',
1 F,/,T10,'FASE(M).....',F5.3,' +/- ',F,///,
1 T2,80(' '))
WRITE(23,140)SIG,QUI0
140 FORMAT(//,T5,'PRIMEIRO AJUSTAMENTO...',//,T7,
1 'SIGMA ZERO A PRIORI=1.',//,T7,
1 'SIGMA ZERO A POSTERIORI=',F,//,T7,'QUI-QUADRADO ',
1 'AMOSTRAL=',F)
WRITE(23,150)SIG2,QUIQ2
150 FORMAT(//,T5,'SEGUNDO AJUSTAMENTO...',//,T7,
1 'SIGMA ZERO A PRIORI=1.',//,T7,
1 'SIGMA ZERO A POSTERIORI=',F,//,T7,
1 'QUI-QUADRADO AMOSTRAL=',F,///,80('*'))
990 CALL RELEASE(22)
CALL RELEASE(23)
END

```

PACBA PACLA PACPA PALPA

TRABALHO DE TERE...CALIBRAÇÃO DE DISTANCIOMETROS ELETRONICOS
ELABORADO POR.....JOEL GRIPP JUNIOR - 1RO. SEMESTRE DE 1966

PACOTES DE SUBROTINAS UTILIZADAS NOS PROGRAMAS QUE DETERMI-
NAM OS ELEMENTOS DE CALIBRAÇÃO DE DISTANCIOMETROS ELETRONICOS

CARACTERISTICAS DOS PROGRAMAS:

1) PRECISAO DUPLA

2) VETOR MAXIMO = 50 ELEMENTOS

3) MATRIZ MAXIMA = 50 X 50 ELEMENTOS

CALCULA A TRANSPOSTA DE UMA MATRIZ M X N

PARAMETROS:

POSICAO 01: MATRIZ ORIGINAL

POSICAO 02: NUM. LINHAS(INT.)

POSICAO 03: NUMERO DE COLUNAS(INT.)

POSICAO 04: MATRIZ RESPOSTA

SUBROUTINE TRANSP(A1,M,N,AT)

IMPLICIT REAL *8(A-H,O-Z)

DIMENSION A1(50,50),AT(50,50)

DO 20 I=1,M

DO 10 J=1,N

AT(J,I)=A1(I,J)

CONTINUE

CONTINUE

RETURN

END

CALCULA O PRODUTO DE MATRIZES

PARAMETROS:

POSICAO 01: MATRIZ QUE PRE-MULTIPLICA

POSICAO 02: MATRIZ QUE POS-MULTIPLICA

POSICAO 03: NUM. LINHAS DA PRIMEIRA(INT.)

POSICAO 04: NUM. COLUNAS PRIM.=NUM. LINHAS SEG.(INT.)

POSICAO 05: NUM. COLUNAS DA SEGUNDA(INT.)

POSICAO 06: MATRIZ RESPOSTA

SUBROUTINE PROD1(AT,A1,M,N,L,A)

IMPLICIT REAL *8(A-H,O-Z)

DIMENSION A1(50,50),AT(50,50),A(50,50)

DO 30 I=1,M

DO 20 J=1,L

A(I,J)=0.

DO 10 K=1,N

A(I,J)=A(I,J)+A1(I,K)*A(K,J)

CONTINUE

CONTINUE

CONTINUE

RETURN

END

CALCULA O PRODUTO DE MATRIZ POR VETOR

PARAMETROS:

POSICAO 01: MATRIZ QUE PRE-MULTIPLICA

POSICAO 02: VETOR

POSICAO 03: NUM. LINHAS DA MATRIZ(INT.)

POSICAO 04: NUM. COLUNAS MATRIZ=NUM. LINHAS VETOR(IN)


```

SUBROUTINE PROD2(AT,B1,N,M,B)
IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
DIMENSION AT(50,50),B1(50),B(50)
DO 50 I=1,N
  B(I)=0.

```

```

  DO 40 K=1,M
    B(I)=B(I)+AT(I,K)*B1(K)

```

```

40 CONTINUE

```

```

50 CONTINUE

```

```

  RETURN

```

```

  END

```

```

C
C
C CALCULA A MATRIZ INVERSA (QUADRADA)
C PARAMETROS:
C   POSICAO 01: MATRIZ ORIGINAL (A)
C   POSICAO 02: VETOR DE TRABALHO DA MESMA ORDEM DE "A"
C   POSICAO 03: ORDEM DA MATRIZ ORIGINAL
C   OBS: SAI A MATRIZ ORIGINAL INVERTIDA

```

```

SUBROUTINE VERSO(A,B,I)

```

```

IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)

```

```

DIMENSION A(50,50),B(50)

```

```

IF(I.EQ.1) GO TO 10

```

```

IM=I-1

```

```

DO 5 K=1,IM

```

```

  DO 2 J=1,IM

```

```

2   B(J)=A(1,J+1)/A(1,1)

```

```

  B(I)=1./A(1,1)

```

```

  DO 4 L=1,IM

```

```

    DO 3 J=1,IM

```

```

3   A(L,J)=A(L+1,J+1)-A(L+1,1)*B(J)

```

```

4   A(L,I)=-A(L+1,1)*B(I)

```

```

    DO 5 J=1,1

```

```

5   A(I,J)=B(J)

```

```

  RETURN

```

```

10  A(1,1)=1./A(1,1)

```

```

  RETURN

```

```

  END

```

```

C
C
C MULTIPLICA MATRIZ POR OUTRA DIAGONAL
C

```

```

SUBROUTINE MULDIA(AT,PESO,N,M,ATP)

```

```

IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)

```

```

DIMENSION AT(50,50),PESO(50),ATP(50,50)

```

```

DO 10 I=1,N

```

```

  DO 5 J=1,M

```

```

    ATP(I,J)=AT(I,J)*PESO(J)

```

```

5   CONTINUE

```

```

10  CONTINUE

```

```

  RETURN

```

```

  END

```

```

C
C
C MULTIPLICA MATRIZ POR UM ESCALAR
C

```

```

SUBROUTINE ESC(A,B,ESC,N,M)

```

```

IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)

```

```

DIMENSION A(50,50),B(50,50)

```

```

DO 1 I=1,N

```

```

  DO 1 J=1,M

```

```

    B(I,J)=ESC*A(I,J)

```

```
1  CONTINUE
   RETURN
   END
```

101

```
C
C
```

```
C  CALCULO DA MATRIZ (A) CONSIDERANDO COMO PARAMETROS
C  O ERRO DE ZERO(C) E O FATOR DE PROPORCIONALIDADE(CK)
C  SUBROUTINE MATAC(A,ALC,N)
C  IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
C  DIMENSION A(50,50),ALC(50)
C  DO 5 I=1,N
C  A(I,2)=ALC(I)
C  A(I,1)=1.
```

```
5  CONTINUE
   RETURN
   END
```

```
C
C
C
C
C
C
```

CALCULO DOS PESOS DAS OBSERVAÇÕES(DIAGONAL)

```
   SUBROUTINE PESO2(N,DPLR,PESO)
   IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
   DIMENSION DPLR(50),PESO(50)
   DO 5 I=1,N
```

```
   PESO(I)=1.00/DPLR(I)**2
5  CONTINUE
   RETURN
   END
```

```
C
C
C
C
```

SUBROUTINE INVER2(ATPA)

```
C
C
C
```

INVERTE UMA MATRIZ QUANDO ELA EH DE 2DA ORDEM

```
   IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
   DIMENSION ATPA(50,50)
   DET=(ATPA(1,1)*ATPA(2,2))-(ATPA(1,2)*ATPA(2,1))
   AAA=ATPA(1,1)
   ATPA(1,1)=ATPA(2,2)/DET
   ATPA(1,2)=-ATPA(1,2)/DET
   ATPA(2,1)=-ATPA(2,1)/DET
   ATPA(2,2)=AAA/DET
   RETURN
   END
```

```
C
C
```

CALCULO DOS COEFICIENTES DA MATRIZ A P/ FOURIER

```
C
```

```
   SUBROUTINE MATAFU(A1,N,ALC)
   IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
   DIMENSION A1(50,50),ALC(50)
   PI=4.00*DATAN(1.00)
   DO 10 I=1,N
   E=(PI*ALC(I))/5.00
   A1(I,1)=DCOS(E)
   A1(I,2)=DCOS(2.00*E)
   A1(I,3)=DCOS(3.00*E)
```



```

      A1(1,4)=DSIN(E)
      A1(1,5)=DSIN(2.D0*F)
      A1(1,6)=DSIN(3.D0*F)
10    CONTINUE
      RETURN
      END

C
C
C
      SUBROUTINE MATA2(A1,N,ALC)
C
C  MONTA A MATRIZ DOS COEFICIENTES(A1) CONSIDERANDO
C  COMO PARAMETROS A AMPLITUDE E FASE DO ERRO CICLICO
C
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      DIMENSION A1(50,50),ALC(50)
      PI=4.D0*DATAN(1.D0)
      DO 5 I=1,N
        AUX=ALC(I)-(10.D0*DFLOAT(IDJNT(ALC(I)/10.D0)))
        A1(1,1)=DSIN((PI*AUX)/5.D0)
        A1(1,2)=DCOS((PI*AUX)/5.D0)
5      CONTINUE
      RETURN
      END

C
C
C
C  FAZ A ANALISE DE FOURIER(CALCULA AMPLITUDE E FASE DA CURVA
C  DO ERRO CICLICO COM AS RESPECTIVAS PRECISOES)
C
      SUBROUTINE CAMFAP(XA,V1,N,AMPL,FASE,SIG2,DPA,DPB,
1    OUTQ2,ATPA,PES2)
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      DIMENSION XA(50),V1(50),ATPA(50,50),AMP(3),FAS(3),PES2(50,50)
      AMP(1)=DSQRT(XA(1)**2+XA(4)**2)
      FAS(1)=2.D0*DATAN(XA(1)/(AMP(1)+XA(4)))
      AMP(2)=DSQRT(XA(2)**2+XA(5)**2)
      FAS(2)=2.D0*DATAN(XA(2)/(AMP(2)+XA(5)))
      AMP(3)=DSQRT(XA(3)**2+XA(6)**2)
      FAS(3)=2.D0*DATAN(XA(3)/(AMP(3)+XA(6)))
      WRITE(23,10)
10    FORMAT(//,T2,BQ('!'),///,T10,'A N A L I S E   D E ',
1    ' F O U R I E R ',///,T10,'TERMOS HARMONICOS',//,T10,
1    'HARMONICO',T28,'A',T43,'B',T58,'AMPLITUDE')
      DO 15 I=1,3
        WRITE(23,11)I,XA(I),XA(I+3),AMP(I)
11    FORMAT(//,T12,I1,T25,F10.7,T40,F10.7,T55,F10.7)
15    CONTINUE
      SVV=0.D0
      DO 16 I=1,N
        SVV=SVV+V1(I)*V1(I)+PES2(I,I)
16    CONTINUE
      SIG2=SVV/(N-6)
      IF(AMP(1).GE.AMP(2).AND.AMP(1).GE.AMP(3))GOTO 20
      IF(AMP(2).GE.AMP(1).AND.AMP(2).GE.AMP(3))GOTO 30
      IF(AMP(3).GE.AMP(1).AND.AMP(3).GE.AMP(2))GOTO 40
20    AMPL=AMP(1)
      FASE=FAS(1)
      II=1
      JJ=4
      GOTO 50
30    AMPL=AMP(2)

```

```

      FASE=FA5(2)
      IJ=2
      JJ=5
      GO TO 50
40    AMPL=AMP(3)
      FASE=FA5(3)
      IJ=3
      JJ=6
50    PI=4.D0*DATAN(1.D0)
      IF (FASE.GE.0.D0) GO TO 55
      FASE=2.D0*PI-DABS(FASE)
55    FASE=(FASE*5.D0)/PI
      DX=SIG2*ATPA(IJ,JJ)
      DY=SIG2*ATPA(IJ,IJ)
      DPA=DSORT((XA(IJ)*YA(IJ)*DX*DPA+XA(IJ)*YA(IJ)*
1      DY*DY)/(AMPL**2))
      DE=DSORT((YA(IJ)*XA(IJ)*DY*DY+XA(IJ)*YA(IJ)*
1      DX*DX)/(AMPL**4))
      DPR=(5.D0+DE)/PI
      DPA=DPA*1000.D0
      QUIQ2=SIG2*DELOAT(N-6)
      AMPL=AMPL*1000.D0
      RETURN
      END

```

```

C
C
C CONSIDERANDO A FORMA LINEAR DA EQUACAO DO ERRO CICLICO
C FAZ-SE AQUI O CALCULO DA AMPLITUDE E FASE COM AS RES-
C PECTIVAS PRECISOS

```

```

      SUBROUTINE PRECAR(VI,N,SIG2,X,Y,AMPL,FASE,DPA,DPA,
1      ,QUIQ2,ATPA,PES2)
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      DIMENSION ATPA(50,50),VI(50),PES2(50,50)
      PI=4.D0*DATAN(1.D0)
      AMPL=DSORT(X*X+Y*Y)
      FASE=2.D0*DATAN(Y/(AMPL+X))
      IF (FASE.GE.0.D0) GO TO 10
      FASE=(2.D0*PI)-DABS(FASE)
10    FASE=(FASE*5.D0)/PI
      SVV=0.D0
      DO 20 I=1,N
      SVV=SVV+VI(I)*VI(I)+PES2(I,I)
20    CONTINUE
      SIG2=SVV/DELOAT(N-2)
      DX=SIG2*ATPA(1,1)
      DY=SIG2*ATPA(2,2)
      DPA=DSORT((X*X*DY*DX+Y*Y*DY*DY)/(AMPL**2))
      DE=DSORT((X*X*DY*DY+Y*Y*DX*DX)/(AMPL**4))
      DPR=(5.D0+DE)/PI
      QUIQ2=SIG2*DELOAT(N-2)
      AMPL=AMPL*1000.D0
      DPA=DPA*1000.D0
      RETURN
      END

```

```

C
C
C CALCULA A PRECISAO DO ERRO DE ZERO E FATOR DE ESCALA E CAL-
C CULA TAMBEM O QUI-QUADRADO AMOSTRAL
      SUBROUTINE PRECCK(V,PES0,N,SIG,DPC,DPCCK,QUIQ,ATPA)
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      DIMENSION V(50),PES0(50),ATPA(50,50)
      SIG=0.D0

```



```

      DO 10 I=1,N
      SIG=SIG+(V(I)*PESU(I)+V(I))
10    CONTINUE
      SIG=SIG/DLOAT(N-2)
      DPC=DSORT(SIG*ATPA(1,1))
      DPCN=DSORT(SIG*ATPA(2,2))
      QUIQ=SIG*DLOAT(N-2)
      DPC=DPC*1000.D0
      RETURN
      END

C
C
C  CALCULA A PRECISAO DO ERRO DE ZERO E O OUT-QUADRADO AMOSIFAI
      SUBROUTINE PRECSF(V,PESU,N,M,SIG,DPC,QUIQ,ATPA)
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      DIMENSION V(50),PESU(50),ATPA(50,50)
      SIG=0.D0
      DO 10 I=1,N
      SIG=SIG+(V(I)*PESU(I)+V(I))
10    CONTINUE
      SIG=SIG/DLOAT(N-1)
      DPC=DSORT(SIG*ATPA(N,M))
      QUIQ=SIG*DLOAT(N-7)
      DPC=DPC*1000.D0
      RETURN
      END

C
C
C  CALCULA PESO PARA O SEGUNDO AJUSTAMENTO
      SUBROUTINE PESV(A,AT,SIG,ATPA,N,DPLB,PES2,M)
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      DIMENSION A(50,50),AT(50,50),ATPA(50,50),DPLB(50),
1    PES2(50,50),AUX(50,50),AUX1(50,50),VT(50)
      CALL PROD1(A,ATPA,N,M,M,AUX)
      CALL PROD1(AUX,AT,N,M,N,AUX1)
      CALL ESC(AUX1,PES2,SIG,N,A)
      DO 10 I=1,N
      PES2(I,1)=PES2(I,1)+DPLB(I)**2
10    CONTINUE
      CALL VERSOL(PES2,VT,M)
      RETURN
      END

C
C
C  SUBROTINA QUE MONTA A MATRIZ DOS COEFICIENTES(A)
C  CONSIDERANDO COMO PARAMETRO: AS DISTANCIAS INTER-
C  PILARES E O ERRO DE ZERO
C
      SUBROUTINE MAT1A(M,N,A)
      IMPLICIT REAL*8(A-H,O-Z)
      DIMENSION A(50,50)
      DO 10 I=1,M
      DO 5 J=1,N
      A(I,J)=0.D0
      IF(J.EQ.N)A(I,J)=1.D0
5    CONTINUE
10   CONTINUE
      LA=0
      DO 100 I=1,N
      NI=N-1
      DO 80 J=1,NI
      LA=LA+1
      I1=I-1

```

JC=11+J

105

DO 50 K=T,JC

A(LA,K)=1,D

50 CONTINUE

80 CONTINUE

100 CONTINUE

RETURN

END

C

RESULTADO EX. DE NSENHO C/ O ARQUIVO EL11JOEL GRIPP JUNIOR
CONSIDERA PRECISAO NOMIAL PARA MEDIA DE OBSERVACOES

P R O G R A M A 3

CALIBRACAO DE DISTANCIOMETROS ELETRONICOS

INSTRUMENTO.....ELTA 2..1PO. LEV. NOV/85

LINHA	DIST. FEITAS
1	70.87255
2	222.79055
3	385.85120
4	648.25065
5	759.67515
6	789.91375
7	151.92685
8	314.98630
9	577.38555
10	688.80835
11	719.04590
12	163.06110
13	425.47035
14	536.89075
15	567.12885
16	262.40950
17	373.83855
18	404.07520
19	111.43170
20	141.66835
21	30.23280

RESIDUOS PRIN. AJUST. (MM)

LINHA	1	-0.77098430493377501
LINHA	2	0.70782663911145743
LINHA	3	-3.19548977023154102
LINHA	4	1.47209965490380235
LINHA	5	3.78031132654286449
LINHA	6	-1.10379782989284308
LINHA	7	-1.41576367188972485
LINHA	8	-4.17908008123268893
LINHA	9	0.68850934390263741
LINHA	10	4.69672101564174937
LINHA	11	0.80261185910601718
LINHA	12	1.48210897472206282
LINHA	13	-3.65030160014256921
LINHA	14	2.75791007149650547
LINHA	15	-1.68619908493905513
LINHA	16	0.51301480920051823
LINHA	17	-1.72877351916056465
LINHA	18	-4.72288267559628494
LINHA	19	1.00363705570402639
LINHA	20	-1.99047210073166614

ERRO DE ZERO(MM)..... 5.90 +/- 1.54836935717140512

AMPLITUDE(MM)..... 3.15 +/- 0.00051197526162430

FASE(M).....2.917 +/- 0.00029326848079679

PRIMEIRO AJUSTAMENTO...

SIGMA ZERO A PRIORI=1.

SIGMA ZERO A POSTERIORI= 0.77588359756964372

QUI-QUADRADO AMOSTRAL= 10.86237036597501210

SEGUNDO AJUSTAMENTO...

SIGMA ZERO A PRIORI= 1.

SIGMA ZERO A POSTERIORI= 0.27241098134165440

QUI-QUADRADO AMOSTRAL= 5.17580864549143358

P R O G R A M A 4

CALIBRACAO DE DISTANCIOMETROS ELETRONICOSINSTRUMENTO.....ELIA 2..1RO. LEV. NOV/85
.....RESULTADO EX. DE USEFOU C/ O ARQUIVO ELI1JOEL GRIPP JUNIOR

ANALISE DE FOURIER

TERMOS HARMONICOS

HARMONICO	A	B	AMPLITUDE
1	0.0031584	-0.0009783	0.0033064
2	-0.0004943	-0.0006222	0.0007947
3	0.0016051	-0.0005920	0.0017108

LINHA	DIST. MEDIDAS
1	70.87255
2	222.79055
3	385.85120
4	648.25065
5	759.67510
6	789.91375
7	151.92685
8	314.98030
9	577.38555
10	688.80835
11	719.04590
12	163.06110
13	425.47035
14	536.89075
15	567.12885
16	262.40950
17	373.83855
18	404.07520
19	111.43170
20	141.66835
21	30.23280

LINHA 1	-0.771
LINHA 2	0.760
LINHA 3	-3.195
LINHA 4	1.472
LINHA 5	3.780
LINHA 6	-1.164
LINHA 7	-1.416
LINHA 8	-4.179
LINHA 9	0.689
LINHA10	4.697
LINHA11	0.803
LINHA12	1.482
LINHA13	-3.050
LINHA14	2.758
LINHA15	-1.080
LINHA16	0.513
LINHA17	-1.729
LINHA18	-4.723
LINHA19	1.004
LINHA20	-1.990
LINHA21	0.751

ERRO DE ZERO(MM).... 5.90 +/- 1.54836935717140512

AMPLITUDE(MM)..... 3.31 +/- 0.00047641068425083

FASE(M).....2.978 +/- 0.00026779831036349

PRIMEIRO AJUSTAMENTO...

SIGMA ZERO A PRIORI=1.

SIGMA ZERO A POSTERIORI= 0.77588359756964372

QUI-QUADRADO AMOSTRAL= 10.86237036597501210

SEGUNDO AJUSTAMENTO...

SIGMA ZERO A PRIORI= 1.

SIGMA ZERO A POSTERIORI= 0.24630535704656392

QUI-QUADRADO AMOSTRAL= 3.69458035509845887

APÊNDICE 2

PROGRAMA PARA A CALCULADORA PC 1211 RP DA SHARP

Faz o cálculo do erro de zero, fator de escala e amplitude e fase do erro cíclico com as respectivas precisões:

Possue as seguintes opções:

- 1.^a) Teclar SHFT Z para inicializar. Os dados de entrada serão:
- número de observações (N)
 - distância observada (1), distância padrão (1)
 - distância observada (2), distância padrão (2)
 - ⋮
 - distância observada (N), distância padrão (N).

E são apresentados os resultados.

- 2.^a) Teclar SHFT X para tornar a calcular com os dados introduzidos anteriormente.

- 3.^a) Teclar SHFT V para inicializar cálculos somente da amplitude e fase do erro cíclico. Neste caso os dados de entrada serão:
- número de observações (N)
 - resíduo (1), distância (1)
 - resíduo (2), distância (2)
 - ⋮
 - resíduo (N), distância (N)

E são apresentados os resultados.

Programa preparado para a PC 1211 da SHARP:

```

10: "Z": CLEAR :
  INPUT "NR0.=
  ";N:I=1:A(51
  )=1
22: IF A(51)=0
  GOTO 46
25: PAUSE "OBS.N
  RO ";I
30: INPUT "D.OBS
  = ";O:A(26+I
  )=O
40: INPUT "D.PAD
  = ";L:A(51+I
  )=L:GOTO 50
45: "X":A(51)=0:
  I=1:A=0:B=0:
  C=0:D=0:E=0
46: O=A(26+I):L=
  A(51+I)
50: A=A+O:B=B+L:
  C=C+O*L
60: D=D+L*L:E=E+
  O*O:I=I+1
70: IF I<=NGOTO
  22
90: T=N*D-B*B
100: Z=(D*A-B*C)/
  T
110: M=(N*C-B*A)/
  T
120: V=E-M*C-Z*A
130: S=ABS (V/(N-
  2))
140: X=J((S*D)/T)
150: Y=J((S*N)/T)
160: PRINT "Z=";Z
170: PRINT "DPZ="
  ;X
180: PRINT "M=";M
190: PRINT "DPM="
  ;Y
200: A(50)=240:
  GOTO 215
210: "V":A(50)=26
  8
215: P=0:Q=0:A=0:
  B=0:C=0:D=0:
  I=1
220: A(51)=0
222: IF A(50)=240
  GOTO 240
225: IF A(51)=1
  GOTO 268
230: GOTO 265
240: O=A(26+I):L=
  A(51+I)
250: V=L-(O-Z)/M
  ):F=PI*L/5
260: GOTO 280
265: INPUT "NR0.O
  BS=";N:A(51)
  =1
268: PAUSE "RES.D
  IS ";I
270: INPUT "RES="
  ;V;"DIS=";L
280: F=PI*L/5:U=
  SIN F:G=COS
  F
285: P=P+U*U:Q=Q+
  G*G
290: A=A+U*G:B=B+
  U*V:C=C+G*V:
  D=D+V*V
300: I=I+1:IF I<=
  NGOTO A(50)
320: T=P*Q-A*A
330: X=(Q*B-A*C)/
  T
340: Y=(P*C-A*B)/
  T
350: R=D-X*B-Y*C:
  S=R/(N-2)
360: J=(S*Q)/T:K=
  (S*P)/T
370: U=J(X*X+Y*Y)
  :G=JABS ((X*
  X*J+Y*Y*K)/(
  U*U))
380: F=ATN (Y/X):
  GOSUB 500
390: H=((X*X*K+Y*
  Y*J)/(U*U*U*
  U))
391: H=(H*5)/PI
400: PRINT "AMP="
  ;U
410: PRINT "DPA="
  ;G
420: PRINT "FASE(
  M)=";F
430: PRINT "DPF="
  ;H
440: END
500: IF X<0GOTO 5
  30
510: IF Y>0GOTO 5
  60
520: F=2*PI-ABS F:
  GOTO 560
530: IF Y>0GOTO 5
  50
540: F=PI+ABS F:
  GOTO 560
550: F=PI-ABS F
560: F=(F*5)/PI
570: RETURN
600: "M": INPUT "X
  1=";X
610: INPUT "X2=";
  Y
620: Z=(X+Y)/2
630: D=J((X-Z)*(X
  -Z)+(Y-Z)*(Y
  -Z))
640: PRINT "DESVI
  O=";D
650: GOTO 600

```

Exemplo de utilização do programa da PC.

Dados de entrada: (ex.: pág. 223, ref. |31|)

	DISTÂNCIAS OBSERVADAS	DISTÂNCIAS PADRÃO	
1	122,9428	122,9673	RESULTADOS:
2	230,9448	230,9642	Z=-1.923089194E-
3	358,9657	358,9715	02
4	476,9647	476,9687	DPZ=1.062884528E
5	594,9307	594,9406	-02
6	117,9518	117,9576	M=1.000024406
7	225,9438	225,9548	IPM=2.708650898E
8	353,9487	353,9632	-05
9	471,9477	471,9606	AMP=7.872225055E
10	589,9347	589,9327	-03
			IPA=1.228317621E
			-03
			FASE(M)=9.419044
			058
			IPF=3.868285908E
			-02

∴

.erro de zero = -Z = 19,23mm ± 10,63mm

.fator de escala = $\frac{1}{M}$ = 0,99997559 ± 0,00002

.amplitude do erro cíclico = 7,87mm ± 1,23mm

.fase = 9,419 m ± 0,0386 m

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ANUNCIACÃO, P.E.M., Equação de pressão do vapor saturado. Curitiba, 1979, 38 p. Tese, Mestrado, UFPR.
- 2 ASHKENAZI, V.; DEETH, C.P.; DODSON, A.H.. EDM accuracy and calibration. S.L., s. ed., 1979, 21 p.
- 3 _____ . The use of the laser interferometer for scale calibration of the Nottingham base line. Cambera, S. ed., 1979. 13 p. (XVII General Assembly of the IUGG).
- 4 ASHKENAZI, V. & DODSON, A.H.. The Nottingham multi-pillar base line. Grenoble, S. ed., 1975 (XVI General Assembly of the International Association of Geodesy).
- 5 BOMFORD, G.. Geodesy. 4 ed. Oxford, University Press, 1983, 856 p.
- 6 BURNSIDE, C.D.. Electromagnetic distance measurement. Great Britain, Crosby Lockwood, 1971, 117 p.
- 7 CAPON, L.B.. Linear regression. A surveyor's approach. The Australian Surveyor, 32(1): p. 35-44, march 1984.
- 8 CHRZANOWSKI, A.. Design and error analysis of surveying projects. Lecture Notes, New Brunswick, nº 47, p. ir., 1977.
- 9 COUCHMAN, H.D.A.. Method of evaluating cyclic errors in EDM equipment. The Australian Surveyor, 26(2): p. 113-115, June 1974.
- 10 DOUBEK, A.. Levantamentos eletrônicos. 1.^a parte, Curitiba, UFPR. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 1974. 123 p.
- 11 _____ . Levantamentos eletrônicos. 2.^a parte. Curitiba, UFPR. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 1974, 102 p.
- 12 _____ . Uma base de aferição. Curitiba, 1974. 72p. Tese, Mestrado, Universidade Federal do Paraná.
- 13 DRACUP, J.F.; FROVCAK, C.J.; TOMHISON, R.W.. Establishment of calibration base lines. NOAA Technical Memorandum, 23 p., August 1977.
- 14 EISENHART, C.. Calibration concepts. Journal of Research of the Naticasl Bureau of Standards, p. 161-187. April-June, 1963.

- 15 EMENIKE, E.N.. On the calibration of EDM instruments. The Australian Surveyor, 31(3): p. 175-185. September 1982.
- 16 FRONCZEK, C.J.. Use of calibration base lines. NOAA Technical Publications, 40 p. December 1977.
- 17 GEMAEL, C.. Introdução ao ajustamento de observações: aplicações geodésicas. Curitiba, UFPR. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, 1984. 211 p.
- 18 GREENE, J.R.. Accuracy evaluation in electrooptic distance-measuring instruments. Surveying and Mapping, 37(3): p. 247-256. September 1977.
- 19 HOUSE, S.L.. Cyclic error in EDM. Surveying and Mapping, 42(3): p. 281-286, September 1982.
- 20 KELLY, M.L.. Field calibration of electronic distance devices: a method of determining and computing corrections to measurements taken with EDM equipment. In: AMERICAN CONGRESS ON SURVEYING AND MAPPING, 39, Washington, D.C., 1979. Proceedings... Falls Church, 1979, p. 425-432.
- 21 MIKAIL, E.M. & GRACIE, G.. Analysis and adjustment of survey measurements. Nostradamus, Van Nostrand Reinhold, 1981. 339 p.
- 22 MOFFIT, F.H.. Calibration of EDM's for precision measurements. Surveying and Mapping, 35(2): p. 147-154. June 1975.
- 23 RICHARDUS, P.. Electroning surveying. Curitiba, 1971. Notas de aula. Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR.
- 24 ROBINSON, A.J.. Field investigation into the New Hewlett-Packard distance meter. In: AMERICAN CONGRESS ON SURVEYING AND MAPPING, Washington, D.C., 1974. Proceedings... Washington D.C., 1974. p. 376-385.
- 25 RUEGER, J.M.. Computation of cyclic error of EDM instruments using pocket calculators. The Australian Surveyor, 23(4): p. 268-275. December 1978.
- 26 _____ . Design and use of base line for the calibration of EDM instruments. In: AUSTRALIAN SURVEYOR CONGRESS, 20th. p. 175-189. Darwin 1977.
- 27 _____ . Recent developments in electronic distance measurement. The Australian Surveyor, 30(3): p. 170-177 September 1980.
- 28 _____ . Remarks on the joint determination of zero error and cyclic errors for EDM instrument calibration. The Australian Surveyor, 28(2): p. 96-103. June 1976.
- 29 SCHWENDENER, H.R.. Electronic distancers for short ranges: accuracy and checking procedures. Survey Review, 21(164): p. 273-281. April 1972.

- 30 SPRENT, A. & ZWART, P.R.. EDM calibration, a scenario. The Australian Surveyor, 29(3), p. 157-169. September 1978.
- 31 SPRENT. A.. EDM calibration in Tasmania. The Australian Surveyor, 30(4): p. 213-227. December 1980.